62.6.01
К-56
42162

Б. Т. КОВАЛЕНКО

ИРРИГАЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕК

ФРУНЗЕ 1965

ГОСЗЕМВОДХОЗ СССР
КИРГИЗСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

Б. Г. Коваленко

ИРРИГАЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕК

(технико-экономические основы)

Фрунзе 1965

В монографии рассматриваются основные схемы ирригационно-энергетического использования рек, принципы выбора параметров комплексных водохозяйственных объектов (емкости регулирующих водохранилищ, мощности и выработки энергии гидроэлектростанций, расчетной обеспеченности и величины площади орошения). Приводятся рекомендации по экономичному распределению воды между компонентами ирригационно-энергетического комплекса в условиях его эксплуатации, назначению наивыгоднейшей очередности и глубины сработки водохранилищ, порядка ограничений промышленных и сельскохозяйственных потребителей воды при ее дефиците в критически маловодные годы.

Монография рассчитана на инженеров, работающих в области проектирования и эксплуатации комплексных ирригационно-энергетических водохозяйственных объектов, а также может быть полезна научным работникам и студентам этого профиля.

Печатается по постановлению
Ученого совета КиргизНИИВХ
и Редакционно-издательского совета
филиала СредазИНТИ в г. Фрунзе.

Ответственный редактор член-корреспондент АН Киргизской ССР
М. И. БОЛЬШАКОВ.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Планируя развитие народного хозяйства СССР, Коммунистическая партия и Советское правительство придают особое значение комплексному и в частности ирригационно-энергетическому освоению водных ресурсов рек. Еще Владимир Ильич Ленин рассматривал проблему строительства электростанций в неразрывном единстве с развитием орошения. Уже в первые годы Советской власти В. И. Ленин мечтал об орошении полей Закавказья и Средней Азии, о том, чтобы дать воду в засушливые волжские степи. При этом ирригация рассматривалась им как составная часть государственного плана электрификации.

Теперь, когда наша страна создала могучую индустрию, пришло время осуществления широких планов орошения с тем, чтобы создать устойчивую базу производства сельскохозяйственной продукции. По поручению Центрального Комитета КПСС Государственные планирующие органы разрабатывают перспективный план ирригационного строительства. Ставится задача в ближайшей перспективе увеличить имеющиеся в стране площади орошения с 9 млн *га* до 28 млн.

Для осуществления этого плана уже начато строительство Токтогульского комплексного гидроузла с гидроэлектростанцией мощностью более 1 млн *квт* и выработкой 4,5 млрд *квт·ч* электроэнергии в год и с водохранилищем многолетнего регулирования стока р. Нарын, которое позволит полностью гарантировать орошение в Киргизии, Узбекистане и Казахстане 2 млн *га* плодороднейших земель и развить лиманное орошение на площади более 400 тыс. *га*;

строится Нурекская ГЭС мощностью 2,7 млн *квт* и выработкой более 11 млрд *квт·ч* электроэнергии в год; Нурекский гидроузел позволит одновременно оросить под хлопок, рис и другие культуры до 1 млн *га* земель в Узбекистане и Таджикистане;

развертывается орошение земель в Туркмении на базе Кара-Кумского канала на площади 600 тыс. *га* для развития хлопководства;

на основе использования энергии гидроэлектростанций Волжской имени В. И. Ленина и имени XXII съезда КПСС развертывается орошение земель в Поволжье и т. д.

Однако наряду с широко развернувшимся строительством комплексных ирригационно-энергетических объектов до сих пор в теории и практике их проектирования и эксплуатации имеются вопросы, не получившие достаточной разработки. К ним могут быть отнесены вопросы экономического обоснования параметров комплексных сооружений и мощности отдельных компонентов комплекса (мощности и выработки энергии гидроэлектростанций, расчетной обеспеченности и величины площади орошения); взаимного согласования требований участников комплекса на воду; очередности и правил сработки водохранилищ; правил ограничения промышленных и сельскохозяйственных потребителей воды при ее дефиците в критически маловодные годы и др. Изучению этих вопросов и посвящена монография.

Работа выполнена в отделе водных ресурсов и их комплексного использования Киргизского научно-исследовательского института водного хозяйства Государственного комитета по хлопководству Средней Азии при Госземводхозе СССР.

Автор выражает глубокую благодарность академику АН Казахской ССР, доктору технических наук, профессору В. П. Захарову, члену-корреспонденту АН Киргизской ССР М. Н. Большакову, старшему научному сотруднику энергетического Института им. Г. М. Кржижановского, доктору технических наук М. П. Фельдману и старшему научному сотруднику Энергетического института СО АН СССР И. П. Дружинину за ценные критические замечания и советы при проведении исследований и подготовке настоящей работы, а также сотруднику И. П. Дьякову, взявшему на себя труд по производству расчетов и оформлению рукописи.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях плановой социалистической экономики Союза ССР водные и водноэнергетические ресурсы рек целесообразно использовать только комплексно, гармонически сочетая требования различных отраслей водопользования — промышленного и бытового водоснабжения, энергетики, ирригации, водного транспорта, сплава леса, рыбоводства и др. Лишь при таком всестороннем подходе к использованию гидроресурсов достигается наивысший народнохозяйственный эффект.

В связи с проектированием, строительством и эксплуатацией большого числа комплексных водохозяйственных объектов в СССР и за рубежом их изучению в настоящее время уделяется очень большое внимание. Показательным является тот факт, что только для решения вопроса распределения общих капиталовложений и эксплуатационных издержек между компонентами водохозяйственного комплекса разработано около 20 различных методов [21, 34]; однако, несмотря на то, что некоторые из этих методов и включены в официальные ведомственные методические указания по определению экономической эффективности компонентов комплексного водохозяйственного строительства, ни один из них еще не получил общего признания. Объясняется это в большинстве случаев условностью исходных положений, принимаемых при разработке этих методов. Такими условностями являются равенство ценности единицы объема воды для различных компонентов комплекса, равенство экономической эффективности капитальных вложений в них, пропорциональность вложений потребляемым компонентом количествам воды, количествам водной энергии, отнесение общих затрат на ведущего компонента и др.

Распределение общих затрат между отдельными компонентами комплекса является очень сложной задачей. Однако

решение этой задачи еще не позволяет оценить общую эффективность комплекса и найти наивыгоднейшую схему использования ресурсов реки. Учитывая, что в условиях социалистического народного хозяйства все капитальные и прочие затраты, необходимые для сооружения и эксплуатации водохозяйственного комплекса, производятся государством, распределение указанных затрат между отдельными компонентами водохозяйственного комплекса является даже не главной задачей. Значительно более важно, по нашему мнению, *решить задачу определения оптимальных параметров комплекса, установления народнохозяйственной эффективности включения в комплекс того или иного водохозяйственного компонента и выбора наивыгоднейшей для народного хозяйства доли использования им ресурсов реки.* Если будет решена проблема выбора участников комплекса*, установления наивыгоднейших (с точки зрения народного хозяйства в целом, а не отдельного водопользователя и даже рассматриваемого комплекса) их параметров и режима использования водных ресурсов, то задача распределения общих затрат между компонентами комплекса будет играть вспомогательную роль и возможные ошибки при ее решении не приведут к ущербу в народном хозяйстве. *В условиях эксплуатации комплексного водохозяйственного объекта весьма важной задачей, до сих пор не получившей теоретического и практического разрешения, является распределение между компонентами комплекса дефицита воды в критически маловодные годы и избытков в годы более благоприятные по водности, чем год расчетной обеспеченности.*

Решению этих задач применительно к условиям проектирования и эксплуатации комплексных ирригационно-энергетических объектов и посвящается настоящая работа. Такие объекты являются типичными для Средней Азии, Кавказа и Казахстана, где ирригация и гидроэнергетика — наиболее важные, а в большинстве случаев и единственные компоненты комплексного использования водных ресурсов рек.

В вопросах распределения воды между компонентами ирригационно-энергетического комплекса существует в настоящее время несколько тенденций. Первая из них сводится к следующему. В связи с тем, что гидроэнергетика в проектируемом комплексном ирригационно-энергетическом объекте,

---

* Под водохозяйственным комплексом следует понимать систему отраслей народного хозяйства, совместно использующих водные и водно-энергетические ресурсы реки. Наличие гидротехнических сооружений общего пользования у них не обязательно.

как правило, может быть заменена сооружением тепловой электростанции, а сельское хозяйство, являющееся в засушливых районах Союза основным водопользователем, не имеет такого определенного заменителя, считается, что сельское хозяйство во всех случаях комплексного использования водного источника не должно иметь никаких ограничений. Гидроэнергетика же должна вписываться в ирригационный график расходов воды. Однако такое решение проблемы использования водных ресурсов по существу становится не комплексным, часто является не оптимальным по величине трудовых затрат на вырабатываемую продукцию, не способствует поискам резервов повышения эффективности использования воды в сельском хозяйстве и приводит к народнохозяйственному ущербу.

Другая тенденция — это стремление получить максимальный экономический эффект от использования водных и водноэнергетических ресурсов рассматриваемого водного источника. При этом предполагается выделять воду в первую очередь и в бóльшем количестве тому компонету комплекса, который обеспечивает бóльший доход от использования единицы ее объема. Такая тенденция может привести к ограничению менее доходных, но весьма важных для народного хозяйства компонентов комплекса, выпуск продукции которых в других местах может оказаться еще более дорогим. В итоге перерасход денежных вложений на выпуск этой продукции может оказаться большим, чем экономия при ограничении компонента в рассматриваемом комплексе.

По-видимому, наиболее правильным будет компромиссное решение, исходным положением которого должен явиться *обязательный выпуск плановой продукции возможных компонентов рассматриваемого водохозяйственного комплекса при минимуме суммарных народнохозяйственных затрат*. Иными словами, параметры отдельных компонентов ирригационно-энергетического комплекса и доли используемого ими стока реки должны быть выбраны такими, при которых суммарные народнохозяйственные затраты на создание планового прироста в выпуске сельскохозяйственной продукции, мощности и выработки электрической энергии к расчетному уровню развития сельского хозяйства и энергетической системы в районе действия проектируемого комплексного гидроузла были бы минимальными. Но так как потребности в дополнительной продукции сельского хозяйства и энергетики всегда превышают возможности производства ее отдельными предприятиями, то снижение производительности компонентов

комплекса при компромиссном распределении между ними водных ресурсов реки будет компенсироваться увеличением производительности других, «дополняющих» (заменяющих) объектов, затраты по которым должны быть учтены в общих затратах производства заданного количества и вида продукции.

В качестве «дополняющего» (заменяющего) объекта в гидроэнергетике принято рассматривать другие перспективные ГЭС или тепловые электростанции. В сельском хозяйстве таких объектов может быть больше — всевозможные переброски стока для орошения площадей в рассматриваемом речном бассейне, насосные подкачки воды, использование для орошения подземных вод, регулирование стока смежных водных источников, перерегулирование стока после использования его по энергетическому графику и, наконец, освоение площадей в другом речном бассейне. В расчет должны приниматься наиболее экономичные из возможных компенсирующих мероприятий. При проектировании любого ирригационно-энергетического объекта теоретически всегда может быть найден заменяющий объект, компенсирующий снижение выработки сельскохозяйственной продукции. Однако некоторые из них могут оказаться очень дорогими, и гидроэнергетика в этом случае должна быть ограничена или вообще исключена из комплекса, как экономически не конкурирующая с сельским хозяйством в требованиях на воду.

ГЛАВА I

ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОМУ ОБОСНОВАНИЮ КОМПЛЕКСНОГО ИРРИГАЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕК

§ 1. Возможные схемы ирригационно-энергетического использования рек

Комплексные ирригационно-энергитические объкты могут отличаться друг от друга по целому ряду признаков — по степени регулирования и перерегулирования стока в целях более полного удовлетворения потребностей в воде обоих компонентов комплекса, возможности использования стока для ирригации после прохождения его через энергетические установки, величине используемого гидростанциями напора и т. д. Увеличение влияния того или иного признака может привести к необходимости изменения методического подхода к решению задач выбора параметров отдельных установок комплекса при их проектировании и наивыгоднейшего распределения воды между компонентами комплекса при их эксплуатации.

В услових высокогорных водных систем Средней Азии и других горных районов Союза наиболее оправдавшей себя схемой использования водных и водноэнергетических ресурсов является схема с использованием верховьев реки и ее притоков для получеия электрической энергии на высокогорных энергетических установках, а низовьев — для орошения. Верховья рек протекают, как правило, в скалистых ущельях с большими уклонами дна, что весьма удобно для сооружения экономичных энергетических установок. Встречающиеся в верховьях равнины, в большинстве случаев малоудобные для сельскохозяйственного освоения в связи с неблагоприятными климатическими, почвенными и другими условиями высокогорья, бывают очень удобны для создания водохранилищ водноэнергетического регулирования.

Наоборот, в низовьях рек, при выходе их из скалистых ущелий, уклоны дна уменьшаются, течение успокаивается, создание гидроэлектрических станций становится трудным, дорогим, а часто и невозможным в связи с невозможностью

создания напора. Для орошения же и сельскохозяйственного освоения равнины весьма благоприятны.

Требования энергетики к водным ресурсам в большинстве своем не совпадают с требованиями к ним со стороны ирригации и с естественным режимом стока реки. Часто попытка улучшить режим реки при помощи водохранилищ или другими способами в интересах одного из компонентов комлекса приводит к ухудшению условий использования воды другим. Поэтому при решении вопросов комплексного использования водного источника возникает необходимость координации интересов отдельных компонентов комплекса и достижения такого решения, при котором будет получен максимальный суммарный народнохозяйственный эффект.

Рассматривая практически возможные компоновки объектов комплексного ирригационно-энергетического использования водных и водноэнергетических ресурсов реки, можно подразделить их на 5 основных групп, различающихся в основном наличием или отсутствием возможности для регулирования стока и местом забора воды на орошение.

К первой группе рассматриваемых нами комплексных объектов отнесем объекты с забором воды для орошения из верхнего бьефа ГЭС независимо от того, могут или не могут они вести регулирование стока.

Ко второй — объекты с забором воды для орошения из нижнего бьефа регулирующих ГЭС. Ирригационно-энергетические объекты, в которых энергетические установки располагаются выше массивов орошения и не ведут регулирования стока (или только суточное), являются по существу некомплексными, и останавливаться на них в настоящей работе не будем. Параметры сооружений таких объектов (мощность и коэффициент использования стока на ГЭС, с одной стороны, и величина орошаемых площадей — с другой) не оказывают влияния друг на друга и могут выбираться без взаимного учета. Методика выбора параметров таких объектов достаточно разработана.

К третьей группе — объекты с забором воды на орошение из нижнего и верхнего бьефов ГЭС.

Во всех схемах ирригационно-энергетического использования водных и водно-энергетических ресурсов реки водохранилища являются «яблоком раздора» между энергетикой и ирригацией, так как энергетика обычно стремится выравнивать сток и использовать водохранилища для переноса части паводочного стока на зиму, а ирригация — с зимы на летний вегетационный период, когда энергетика, как правило, не

испытывает затруднений. Разрешить эти противоречия можно лишь исходя из соображений получения максимального суммарного народнохозяйственного эффекта от использования водохранилищ.

Особо следует остановиться на водохранилищах, обладающих емкостью для многолетнего регулирования стока. Такие водохранилища, повышая обеспеченность годовых отдач воды, улучшают условия эксплуатации обоих компонентов ирригационно-энергетического комплекса независимо от того, из верхнего или из нижнего бьефа производится забор воды на орошение.

К четвертой группе комплексных объектов могут быть отнесены объекты с перерегулированием стока для целей ирригации после прохождение его через ГЭС и регулирования по энергетическому графику. Подобная компоновка сооружений комплексного ирригационно-энергетического объекта позволяет получить от водного источника максимальный энергетический и ирригационный эффекты. При полном перерегулировании стока для ирригации параметры ГЭС и величина площади орошения не зависят друг от друга, однако для такого перерегулирования требуются значительные емкости водохранилищ. Неполное перерегулирование стока требует увязки интересов отдельных компонентов и нахождения компромиссного решения, обеспечивающего максимальный суммарный народнохозяйственный эффект.

К пятой группе относятся объекты с основным забором воды на орошение ниже каскада регулирующих гидроэлектростанций. Каскад регулирующих гидроэлектростанций вносит определенную специфику в схему комплексного использования водных и водноэнергетических ресурсов реки тем, что максимальный экономический эффект может быть достигнут путем использования нижележащих водохранилищ каскада для регулирования стока и в основном для орошения, а вышележащих — для энергетики.

§ 2. Сравнение расчетных условий проектирования и эксплуатации комплексных водохозяйственных объектов

В связи с различием основной экономической проблемы, разрешаемой при производстве перспективных расчетов проектирования и текущих расчетов эксплуатации водохозяйственных объектов, различными должны быть и подходы к ним [14].

В условиях проектирования комплексного водохозяйст-

венного объекта основной задачей является выбор таких расположения и параметров сооружений (мощности ГЭС, орошаемой площади сельскохозяйственных угодий и т. д.), которые обеспечат минимум новых народнохозяйственных издержек на получение заданного количества электроэнергии и сельскохозяйственной продукции. Весьма важно при этом иметь представление о возможных колебаниях расходов воды в реке и дефицитах ее в критически маловодные годы. В этом случае все гидрологические характеристики используемого водного источника должны рассматриваться во всем диапазоне возможного их изменения. При перспективном проектировании нет особой необходимости в скрупулезно точной оценке изменения напоров, к. п. д. ГЭС и оросительных систем в течение года, изменения оросительных норм сельскохозяйственных культур в различные годы и т. д. Весьма важно предусмотреть мероприятия по ликвидации возможных ущербов от ограничения потребителей в воде в критически маловодные годы и наметить пути сохранения материального баланса выпускаемой продукции.

В отличие от этого в условиях эксплуатации комплексного водохозяйственного объекта главной задачей расчетов является выбор на основе не статистических, а реальных данных прогноза водности реки и заполнения водохранилищ на ближайший период времени (год, паводок, межень или вегетационный период) такого распределения стока реки между компонентами комплекса, которое удовлетворит требованию надежности и обеспечит максимальный суммарный народнохозяйственный эффект от его использования. В этом случае вопрос о капиталовложениях не рассматривается, так как он является решенным, а сооружения — построенными. Со всей серьезностью учитываются возможные дефекты сооружений, изменения их к. п. д., напоров ГЭС, оросительных норм и др. В критически маловодные (дефицитные) годы вода между компонентами должна распределяться исходя из соображений сведения к минимуму суммарного ущерба от ограничения потребителей в воде.

Различие расчетных условий проектирования и эксплуатации комплексных объектов настолько велико, что иногда приводит к принципиально различным выводам. Подтверждением этого может служить пример Западной ветки Большого Чуйского канала, построенного для орошения около 100 тыс. *га* сельскохозяйственных земель Чуйской долины и подачи воды Аламединским ГЭС Фрунзенской энергосистемы, сооруженным на сбросе воды из канала.

Рассматривая (применительно к современным условиям) проектирование такого объекта, можно прийти к выводу об экономической нецелесообразности энергетических попусков воды в течение вегетационного периода года и сооружения весьма малоэкономичных ГЭС.

В условиях же реальной эксплуатации объекта в периоды глубокого дефицита энергии в системе и появления значительных ущербов от недостатка электроэнергии в промышленности попуски воды для существующих ГЭС Аламединского каскада оказываются экономически целесообразными.

§ 3. Расчетный режим стока реки

Специфической особенностью водохозяйственных объектов является непостоянство их режимов работы, обусловленное изменчивостью во времени используемых ими водных ресурсов. При этом изменение режима расходов воды каждого используемого водотока представляет собой сложный непрерывный процесс. К сожалению, современные методы прогнозов стока не позволяют получить сколько-нибудь достоверные данные на много лет вперед. Поэтому в практике при изучении возможных режимов работы водохозяйственных объектов приходится прибегать к анализу прошлых наблюдений за стоком и основные статистические характеристики его изменения переносить с теми или иными коррективами на предстоящий период.

Отсутствие достаточно длительных рядов наблюдений за стоком рек в многолетнем разрезе пока не позволяет или почти не позволяет выявить закономерности в чередовании объемов годовых стоков. Однако, как показывают специальные работы ряда авторов [13], распределение стока внутри года для большинства рек подчиняется определенным закономерностям. Поэтому в настоящее время получили распространение задания стока на предстоящие годы в вероятностной форме, а распределение его внутри года — в форме типового гидрографа, характерного для всех или определенной по водности группы лет.

Типовой гидрограф строится на основе изучения и установления по данным прошлых лет наблюдений таких закономерностей режима речного стока, которые с определенной степенью надежности можно прогнозировать на будущее. Типовой гидрограф должен правильно отражать общий характер режима реки. Второстепенные же детали, являющиеся особенностью каждого отдельного года, не имеют сущест-

венного значения. Дополнительно должны учитываться возможные изменения в объеме и распределении стока, вызванные хозяйственной деятельностью человеческого общества.

Типовые гидрографы для ряда рек и методика их построения приводятся в работе И. П. Дружинина [13]. Там же сделан обзор работ по построению типового гидрографа методами других авторов.

Использование типового гидрографа в качестве расчетного внутригодового распределения стока при выборе параметров комплексных ирригационно-энергетических объектов является весьма удобным, так как в большинстве своем комплексные объекты ведут регулирование стока (§1) и, следовательно, возможные небольшие отклонения в распределении внутригодового стока от принятого типового будут сглажены регулированием.

§ 4. Оценка экономической эффективности капитальных вложений в ирригацию и гидроэнергетику

Определение экономической эффективности комплексного использования водных ресурсов и гидротехнических сооружений представляет определенные трудности. Эти трудности объясняются в основном отсутствием надежных методов разрешения противоречий в режиме использования водных ресурсов отдельными участниками водохозяйственного комплекса; методов определения их оптимальных рабочих параметров; методов распределения между участниками комплекса общих капитальных вложений и ежегодных издержек эксплуатации и т. д. Применительно к ирригационно-энергетическим водохозяйственным комплексам решение этой задачи усложняется еще более в связи с тем, что принятые в настоящее время методы оценки экономической эффективности капитальных вложений в сельское хозяйство и ирригацию, с одной стороны, и в энергетику — с другой, базируются на различной экономической основе.

Экономическая эффективность капитальных вложений, направляемых на мелиорацию и организацию сельскохозяйственного производства на мелиорируемых землях, определяется обычно или показателем рентабельности предприятия $Э_р$, вычисляемым как отношение чистого дохода к общей сумме совокупных капитальных вложений

$$Э_р = \frac{Ц - С}{К}, \qquad (1)$$

или величной срока их «абсолютной» окупаемости $O=\frac{1}{Э_р}$,

где $Ц$ — годовая продукция сельскохозяйственного предприятия, выраженная в оптовых ценах;

$С$ — себестоимость годовой продукции;

$К$ — капитальные вложения в мелиорацию и сельскохозяйственное освоение мелиорируемых земель.

В эти выражения часто вводятся различного рода уточнения, учитывающие начисления на временно не функционирующие капитальные вложения и доход предприятия в период строительства и освоения объекта, однако физический их смысл остается тем же.

Оценка экономической эффективности в энергетическом строительстве производится обычно путем сопоставления различных технических вариантов удовлетворения заданной потребности народного хозяйства в энергии и мощности. При выборе объекта энергетического строительства исходят из того, что в случае отказа от сооружения проектируемой гидроэлектростанции необходимо создать другой источник электрической энергии (другую ГЭС, тепловую или атомную электростанцию), при котором электроснабжение народного хозяйства будет обеспечено так же, как и при наличии ГЭС.

Основыми показателями, используемыми при сопоставлении между собой различных вариантов, являются следующие: величина капитальных вложений $К$, необходимых для сооружения рассматриваемого энергетического объекта, и ежегодные издержки производства (себестоимость электроэнергии) $С$.

И тот и другой подход к оценке эффективности капитальных вложений применительно к комплексным водохозяйственным объектам страдает определенными недостатками. Главным недостатком методов, базирующихся на анализе доходности предприятий, является использование для оценки величины чистого дохода значений закупочной или реализационной цены на продукцию, которые определяются не столько уровнем издержек производства, сколько различными хозяйственно-политическими, планово-экономическими, финансовыми и другими факторами, зависящими в основном от соотношения спроса и предложения на эту продукцию и имеющими весьма малое отношение к деятельности самого предприятия. Реально в социалистическом обществе не эффективность капитальных вложений в предприятие определяется ценами на его продукцию, а закупочные и реализационные цены — эффективностью капитальных вложений, ибо

повышение эффективности капитальных вложений всегда стимулирует снижение цен. Этим положением в определенной степени объясняется необходимость проведенного в 1962 г. повышения закупочных и реализационных цен на животноводческую продукцию, зональной дифференциации закупочных и реализационных цен на сельскохозяйственную продукцию и др.

Отсутствие в современных условиях методов для определения действительной величины стоимости продукции производственных предприятий не позволяет найти и абсолютную экономическую эффективность капитальных вложений в них. Следовательно, показателем рентабельности $Э_р$, базирующимся на весьма приближенной оценке стоимости продукции, можно воспользоваться лишь для приближенного определения эффективности и срока окупаемости капитальных вложений*. А для сравнения эффективности возможных вариантов сельскохозяйственного и мелиоративного строительства, осуществляемого в различных зонах, показатели рентабельности в связи с зональностью закупочных и реализационных цен вообще не пригодны.

Однако в условиях социалистической экономики наряду с отсутствием возможности для определения абсолютной экономической эффективности капитальных вложений во вновь проектируемые производственные объекты отсутствует и необходимость в ней независимо от того, касается это вопроса проектирования отдельного узла или объекта в целом. Это объясняется тем, что *создание нового производственного объекта в условиях социалистического общества является* в каждом конкретном случае *экономической необходимостью*, обусловленной требованиями объективно существующего экономического закона планомерного (пропорционального) развития народного хозяйства.

Целью экономического обоснования проектируемого объкта производства заданной продукции является в данном случае сравнительная экономическая оценка всех возможных вариантов производства этой продукции путем сопоставления их основных экономических показателей: капитальных вложений K, необходимых для сооружения объекта, и его ежегодных издержек производства (себестоимости продукции) C. Лучшим вариантом при этом является тот, который при одинаковом производственном эффекте требует наимень-

---

* Исключение могут составить случаи, когда определяется экономическая эффективность собственных капитальных вложений, сделанных коллективными хозяйствами в целях увеличения своих доходов.

ших капитальных вложений и ежегодных издержек производства. Если ежегодные издержки производства в одном из вариантов противостоят меньшим капитальным вложениям в другом, наилучшим из них будет тот, который требует наименьших интегральных (суммарных) затрат за нормативный для данной отрасли срок окупаемости [1]:

$$K_i + T_o C_i = min \text{ или } C_i + E K_i = min, \qquad (2)$$

где K_i — капитальные вложения по каждому варианту;

C_i — себестоимость продукции за год по тому же варианту;

T_0 — отраслевой нормативный срок окупаемости;

$E = \frac{1}{T_o}$ — отраслевой нормативный коэффициент эффективности.

Сравнение возможных вариантов получения заданного количества и вида продукции и выбор наивыгоднейшего из них является основой удешевления проектируемой продукции.

Все эти положения учитываются в методе сравнительной оценки экономической эффективности капитальных вложений, применяемом для определения эффективности энергетического строительства. Основное возражение против использования этого метода для определеления экономической эффективности капитальных вложений в мелиорацию заключается в том, что сравнение только мелиоративных вариантов часто не дает нужных результатов, так как производительность мелиоративных объектов еще не определяет производительности сельского хозяйства. При сравнении же мелиоративно-хозяйственных комплексов непосредственный эффект мелиорации и экономическая эффективность непосредственно мелиоративных вложений остаются невыясненными. Это является недостатком метода в применении его к оценке экономической эффективности капитальных вложений в мелиорацию, и в этом отношении метод требует доработки.

Однако там, где возделывание земель без мелиорации является нецелесообразным, в частности в Средней Азии, где земледелие невозможно без орошения, такое возражение не имеет смысла, так как в этом случае на мелиорацию должен быть отнесен весь производственный эффект сельскохозяйственного мероприятия. Сравниваемые мелиоративные варианты при этом должны быть приведены в сопоставимые условия по полной производительности обслуживаемых ими хозяйств.

Необходимость принятия единого метода для оценки экономической эффективности капитальных вложений в комплексные ирригационно-энергетические годроузлы заставляет остановиться на одном из методов, рассмотренных выше. Критический анализ этих методов приводит к выводу, что для решения поставленной задачи правильнее воспользоваться методом сравнительной экономической оценки. Это будет и более удобно, так как общий объем экономических исследований в мелиорации и энергетике, базирующихся на этом методе, значительно больше и поэтому принятие его для технико-экономических расчетов комплексных ирригационно-энергетических объектов потребует меньших доработок. Применение этого метода для технико-экономического обоснования параметров оросительных систем рассмотрено в главе II.

§ 5. Оценка экономической эффективности комплексных гидроузлов

Исходным принципом определения экономической эффективности комплексных водохозяйственных объектов может быть принят принцип оценки и сравнения эффективности комплекса в целом с возможным лучшим заменяющим некомплексным вариантом производства той же продукции. При таком подходе к оценке эффективности комплекса отпадает необходимость в распределении общих затрат между отдельными его участниками и в оценке их собственной эффективности.

Критерием для определения экономической эффективности сравниваемых вариантов будет при этом величина их интегральных или среднегодовых расчетных затрат за нормативный срок окупаемости T_0 (2). В состав затрат должны быть включены капитальные вложения, возможные потери от их замораживания во время строительства и освоения сравниваемых вариантов и ежегодные издержки эксплуатации. За нормативный срок окупаемости T_0 может быть принят период в 10 лет, рекомендуемый «Типовой методикой определения экономической эффективности капитальных вложений и новой техники в народном хозяйстве СССР» [1] в качестве норматива для энергетики и транспорта. Для сельского хозяйства и ирригации такого норматива пока нет. Но, учитывая, что при оценке экономической эффективности комплексных узлов компоненты комплекса должны находиться в одинаковых условиях, для всех них должен быть принят единый норматив срока окупаемости.

Более эффективным из сопоставляемых вариантов является тот, который требует меньших интегральных или среднегодовых расчетных затрат за нормативный срок окупаемости T_0. Равенство в интегральных затратах сопосталяемых вариантов определяет собой число лет T эксплуатации более капиталоемкого варианта, в течение которого дополнительные, по сравнению с заменяющим вариантом, капитальные вложения «окупятся» за счет его меньших ежегодных издержек производства. Капиталоемкий вариант будет также эффективным, если дополнительные капиталовложения в него «окупятся» в течение срока t, меньшего, чем нормативный срок эффективности T_0.

Сравниваемые с ирригационно-энергетическим комплексом объекты — заменяющая электрическая станция и заменяющее орошение — должны быть лучшими из возможных перспективных объектов развития энергетики и сельского хозяйства в районе действия проектируемого гидроузла. Так, в качестве варианта для сравнения с энергетическим компонентом комплекса следует рассматривать дополнительную мощность и выработку электроэнергии технически передовой районной конденсационной электростанции (КЭС), характерной для данного района и энергосистемы.

В качестве сравниваемого варианта в орошении могут рассматривается переброска стока, насосные подкачки воды, использование для орошения подземных вод, регулирование стока смежных водных источников, мероприятия по экономии оросительной воды (покрытие каналов, переход на более совершенные способы полива и др.), освоение равнопродуктивных площадей в другом речном бассейне и т. д. Если в качестве варианта для сравнения выступают другие площади орошения, то в расчет должны быть приняты те из них, которые предполагается осваивать под ту же, профилирующую для проектируемого массива культуру, но имеющие худшие экономические показатели и поэтому осваиваемые во вторую очередь, т. е. те, которые практически в ближайшем будущем явятся дополняющими площадями развития производства проектируемой сельскохозяйственной продукции. Из всех возможных вариантов производства сравнивать с пректируемым следует только наиболее экономичный.

Непременным условием сравнения вариантов является полная сопоставимость проектируемого водохозяйственного комплекса и заменяющих (дополняющих) объектов как по количеству, так и по качеству вырабатываемой ими продукции. Если одним из сопоставляемых вариантов это условие

физически не может быть выполнено, то должны быть предусмотрены дополнительные объекты, компенсирующие количество и качество недодаваемой продукции, или вариант с меньшей производительностью должен сравниваться с соответствующей ему частью варианта большей производительности.

Основные условия сопоставимости вариантов заключаются при этом в следующем:

1. Сравниваемые варианты должны быть одинаковой полезной мощности и иметь оптимальные параметры всех своих элементов. Так, сопоставляемые электростанции (или их доли) должны обеспечивать равный полезный отпуск энергии, равную полезную мощность и равные условия надежности энергоснабжения потребителей района. Известно, что КЭС по сравнению с соответствующими по мощности ГЭС имеют на 4—8% больший расход электроэнергии на собственные нужды, примерно на 7% большие нормы на капитальные ремонты и примерно на 6% большую аварийность. Учитывая особенность энергетического производства, заключающуюся в непрерывности и обязательном совпадении во времени производства и потребления электроэнергии, можно сделать вывод о том, что мощность КЭС должна быть на 15—20% больше мощности заменяемой ею ГЭС.

Величину мощности тепловой электростанции, сооружение которой необходимо осуществить взамен проектируемой гидроэлектростанции, рекомендуется [25] определять по формуле

$$N_т = N_{раб}(1+\alpha^c+\alpha^p+\alpha^a-\alpha^н_г \pm \alpha^л)+N_{рез}(1+\alpha^c \pm \alpha^л), \qquad (3)$$

где $N_т$ — заменяющая мощность тепловой электростанции;

$N_{раб}$ — заменяемая мощность проектируемой ГЭС, которой она участвует к покрытии графика нагрузки энергосистемы:

$N_{рез}$ — мощность проектируемой гидроэлектростанции, предназначенная для ведения функций аварийного резерва;

α^c — превышение норм расхода на собственные нужды КЭС по сравнению с нормами для ГЭС;

α^p — превышение нормы на капитальный и текущий ремонты агрегатов КЭС, оборудованных по блочной схеме котел-турбины, по сравнению с нормой на текущий ремонт агрегатов ГЭС;

α^a — превышение нормы аварийности агрегатов КЭС, оборудованных по блочной схеме котел-турбина, по сравнению с нормой аварийности ГЭС;

$\alpha_г^{н}$ — относительное (средневзвешенное) снижение располагаемой мощности проектируемой ГЭС в расчетном периоде из-за падения напора (определяется соответствующими расчетами);

$\alpha^{л}$ — разность норм потерь в линиях электропередач, связанных с выдачей мощности проектируемой ГЭС и заменяющей ее КЭС.

Величина заменяющей выработки электроэнергии КЭС определяется по формуле

$$Э_т = Э_г(1 + \alpha^{с} \pm \alpha^{л}). \qquad (4)$$

Для заменяющей КЭС должны быть выбраны оптимальные число и мощность агрегатов, давление и температура пара, топливо и т. д.

Сопоставляемые массивы орошения при наивыгоднейших для них числе, размерах и производительности гидротехнических и других сооружений, степени механизации и т. д. должны обеспечивать равный выпуск сельскохозяйственной продукции. Так как рассматриваемые массивы орошения (основной проектируемый и заменяющий) могут располагаться в различных почвенных, климатических и других условиях, то равенство их площади еще не удовлетворяет условиям сопоставимости, равными должны быть урожаи на них, т. е.

$$F_1 У_1 = F_2 У_2,$$

где F_1 и F_2 — площади сопоставляемых массивов в *га*;

$У_1$ и $У_2$ — средняя проектная урожайность культуры на массивах в *ц/га*.

При меньшей удельной урожайности на заменяющем массиве площадь его должна быть в $\frac{У_1}{У_2} = \lambda$ раз больше.

$$F_2 = \lambda F_1 . \qquad (5)$$

Сопоставление должно быть проведено по одной и той же культуре, основной для проектируемого массива орошения.

Экономические сопоставления сравниваемых вариантов при заданной оптимальной их мощности и производительности могут осуществляться по абсолютным или средним удельным величинам вложений на производство заданной продукции. Приросты же производительности (мощности) сравниваемых вариантов для выбора их параметров должны быть сопоставлены по величинам удельных затрат (относи-

тельных приростов) на единицу дополнительной мощности (производительности) предприятий.

2. В сравниваемых вариантах должны быть учтены капиталовложения как в основные, так и в смежные объекты. Так, при оценке капиталовложений в тепловую электростанцию, сравниваемую с ГЭС, должны быть учтены дополнительные капиталовложения на расширение топливной промышленности, транспорт топлива, сжигаемого на станции и др.

При оценке капиталовложений в ГЭС должны быть учтены затраты на перенесение из зоны затопления населенных пунктов, промышленных предприятий, дорог, сельскохозяйственных угодий и т. д.

При оценке капиталовложений в орошение с электромеханическим подъемом воды на поля, включая и откачку подземных вод для орошения, должны быть учтены дополнительные капиталовложения в энергетику — сооружение необходимой для этого электростанции и линий электропередачи. Вложения в сооружение электростанции не следует учитывать, если насосные станции электромашинного орошения будут потреблять только сезонные избытки энергии в энергосистеме.

Продукция смежных объектов в сравниваемых вариантах должна учитываться при этом не по тарифу, а по ее себестоимости (например, топливо и его транспорт при рассмотрении варианта ТЭС, электроэнергия для варианта электромашинного орошения и т. д.).

Одинаковые слагаемые (по капитальным вложениям и ежегодным эксплуатационным издержкам) можно не включать в сравниваемые варианты, так как при их сопоставлении выявляется не абсолютная экономичность, а только относительная (одного варианта по отношению к другому).

3. При сравнении вариантов, различающихся по продолжительности строительства и полного их освоения, должно быть учтено «омертвление», или «замораживание», капитальных вложений в них. Увеличение срока строительства предприятия приводит к более позднему удовлетворению народного хозяйства в выпускаемой им продукции. Чем короче срок строительства предприятия, чем быстрее входит оно в сферу хозяйственного использования, тем выгоднее оно для народного хозяйства. В соответствии с типовой методикой АН СССР по определению экономической эффективности капитальных вложений [1] капиталовложения с учетом «замораживания» могут быть определены по формуле

$$K_3 = K_1(1+E)^{t-1} + K_2(1+E)^{t-2} + \ldots + K_t\,, \qquad (6)$$

где K_1; K_2 и т. д. — капиталовложения по годам строительства;

E — нормативный коэффициент эффективности;

t — период строительства предприятия в годах.

4. Если капитальные вложения осуществляются в разные сроки, то сравнение вариантов следует производить с приведением затрат более поздних лет к текущему моменту путем деления их на коэффициент приведения

$$K_{прив} = (1+E)^t \quad , \qquad (7)$$

учитывающий средний эффект, который может быть получен в данной отрасли при условии производительного использования капитальных вложений.

t — период в годах, по истечении которого потребуются окончательные вложения.

Полное соблюдение всех условий сопоставимости вариантов позволяет выбрать наиболее целесообразное и всестороннее экономически обоснованное техническое решение поставленной задачи.

§ 6. Экономические показатели компонентов комплексного ирригационно-энергетического использования водных ресурсов

Основные экономические показатели, используемые для характеристики экономики предприятия, а также в технико-экономических расчетах при выборе наивыгоднейших параметров сооружений водохозяйственного строительства, подразделяются на абсолютные экономические показатели —

K — капиталовложения, необходимые для сооружения предприятия;

C — его ежегодные эксплуатационные издержки (себестоимость продукции) —

и удельные экономические показатели, которые в свою очередь могут быть подразделены на средние и дополнительные, являющиеся (в отличие от средних) экономической характеристикой определенной единицы развития мощности или производительности предприятия.

К основным удельным экономическим показателям относятся:

1) удельные капиталовложения на единицу мощности

предприятия ($\bar{к}_N = \frac{K}{\bar{N}}$ — средние удельные капиталовложения на 1 *квт* установленной мощности электростанций, *руб/квт*; $\bar{к}_{га} = \frac{K}{F}$ — то же на 1 *га* освоенной площади в сельском хозяйстве, *руб/га*; $к_N = \frac{dK}{dN}$ — удельные капиталовложения на 1 дополнительный *квт* мощности, *руб/квт*; $к_{га} = \frac{dK}{dF}$ — то же на 1 дополнительный *га*, *руб/га*);

2) удельные капиталовложения на единицу выпуска продукции предприятия ($К_э = \frac{K}{Э}$ — удельные капиталовложения на 1 *квт·ч* средней годовой выработки энергии, *руб/квт·ч*; $к_э = \frac{dK}{dЭ}$ — то же на 1 дополнительный *квт·ч* среднегодовой выработки энергии, *руб/квт·ч*);

3) удельные издержки производства на единицу вырабатываемой продукции, или ее себестоимость ($\bar{с}_э = \frac{C}{Э}$ — средняя себестоимость электроэнергии, *коп/квт·ч*; $\bar{с}_ц = \frac{C}{Ц}$ — то же сельскохозяйственной продукции, *руб/ц*; $с_э = \frac{dC}{dЭ}$ — себестоимость 1 *квт·ч* дополнительной выработки энергии, *коп/квт·ч*; $с_ц = \frac{dC}{dЦ}$ — то же дополнительного центнера сельхозпродукции, *руб/ц*);

4) удельные издержки производства на единицу его мощности ($\bar{с}_N = \frac{C}{\bar{N}}$ — годовые издержки производства электростанции на 1 средний *квт* установленной мощности, *руб/квт*; $\bar{с}_{га} = \frac{C}{F}$ — то же сельского хозяйства на 1 *га* освоенной площади, *руб/га*; $с_N = \frac{dC}{dF}$ годовые издержки производства дополнительного киловатта мощности станции, *руб/квт*; $с_{га} = \frac{dC}{dF}$ —то же дополнительного гектара, *руб/га*).

При помощи нормативного срока окупаемости T_0, выраженного в годах, или нормативного коэффициента эффективности $E=\frac{1}{T_0}$ единовременные капитальные вложения могут бы условно приведены к текущим издержкам производства и наоборот. Среднегодовые расчетные затраты производства могут быть выражены при этом зависимостью

$$З=EK+C \quad \text{или} \quad \bar{з}=E\bar{к}+\bar{c}; \qquad з=Eк+c,$$

где $З$ — абсолютные среднегодовые расчетные затраты предприятия;

$\bar{з}$ и $з$ — удельные среднегодовые расчетные затраты.

Проведенный в ряде работ [15, 24 и др.] анализ закона изменения суммарных капитальных затрат и ежегодных эксплуатационных издержек производства по энергетическим и сельскохозяйственным предприятиям показал, что в большинстве своем он представляет собой монотонно возрастающую с увеличением мощности предприятия функцию, которая на отдельных весьма значительных участках практически может быть принята линейной (рис. 1). Средние удельные

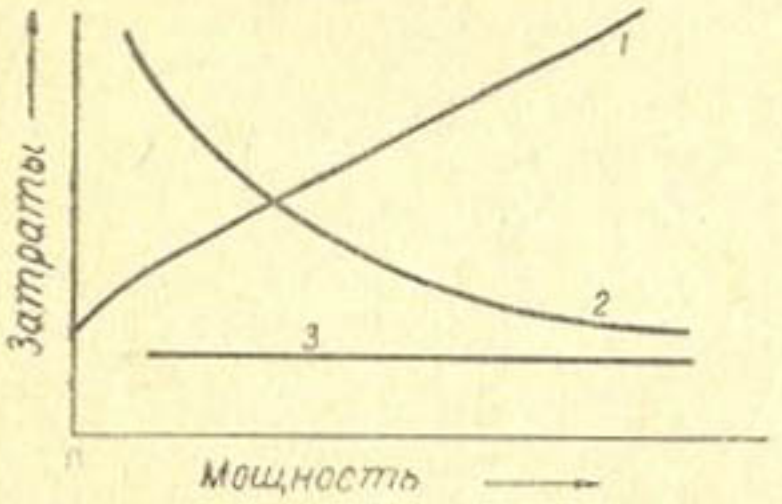


Рис. 1. Типичные формы зависимостей абсолютных *1*, средних 2 и дополнительных *3* удельных экономических показателей от мощности энергетических и сельскохозяйственных предприятий.

экономические показатели при этом изменяются по сложному криволинейному закону. Удельные экономические показатели на дополнительную единицу мощности предприятия (капитальные вложения, ежегодные издержки производства, среднегодовые расчетные затраты и др.) на этих участках постоянны, что делает их очень удобными для технико-экономических расчетов при определении оптимальных параметров проектируемых предприятий.

Рядом авторов на основе анализа статистических данных по существующим предприятиям сделаны предложения по выражению годовых эксплуатационных издержек в долях от единовременных капитальных вложений. Так, по данным М. П. Фельдмана, В. И. Воздвиженского [39] и Ш. Ч. Чокина

[46], для предварительных расчетов ГЭС можно принимать следующие среднестатистические размеры годовых эксплуатационных издержек:

Мощность ГЭС в тыс. *квт*	10	25	50	100	150	250	500
Годовые эксплуатационные издержки в % от капитальных затрат	5,1	4,7	4,3	4,0	3,8	3,6	3,5

Следовательно, для ГЭС мощностью 100 тыс. *квт* и более при нормативном коэффициенте эффективности $E=0{,}1$

$$\overline{з}^{г}_{N}=E\overline{к}_{N}+\overline{с}_{N}=(0{,}14\div 0{,}13)\overline{к}_{N}. \qquad (8)$$

Для тепловых электростанций Ш. Ч. Чокиным [46] на основе данных М. П. Фельдмана, И. Н. Оранского, Н. А. Григоровича и др. приведены следующие цифры:

Мощность ТЭС в тыс. *квт*	10	25	50	100	150	250	500
Эксплуатационные издержки в % от капитальных затрат (без стоимости топлива)	13,0	12,0	11,2	10,0	9,3	8,2	7,0

Учитывая, что мощность и параметры конденсационной электростанции определяются общим электробалансом энергосистемы, а мощность ГЭС лишь вытесняет некоторую ее долю, будет вполне обоснованно сравнивать ГЭС (при выборе ее мощности) с соответствующей долей вытесняемой мощности КЭС. Общая мощность КЭС при этом может быть принята более 500 тыс. *квт*. Удельные среднегодовые расчетные затраты по тепловым конденсационным электростанциям (без стоимости топлива на выработку электроэнергии) в этом случае могут определяться по выражению

$$\overline{з}^{т}_{N}=E\overline{к}_{N}+\overline{с}_{N}=(0{,}17\div 0{,}16)\overline{к}_{N}. \qquad (9)$$

Уравнениями (8) и (9) можно воспользоваться для приближенной оценки удельных среднегодовых расчетных затрат и на дополнительный киловат мощности проектируемых электростанций.

При технико-экономических сопоставлениях ГЭС и КЭС дополнительно должны быть учтены затраты на топливо, которые в предварительных расчетах могут быть определены как

$$\Delta з^{в}_{N} = \alpha_э s b h_г,$$

где $\alpha_э$ — коэффициент сопоставимости выработки энергии ГЭС и заменяющей ее КЭС;

s — стоимость топлива в рублях за 1 *кг*;

b — удельный расход услóвного топлива на КЭС в *кг/квт·ч*; для крупных КЭС может быть принят равным $0{,}4 \div 0{,}35$;

$h_г$ — число часов использования заменяемого киловата мощности ГЭС.

Полные удельные среднегодовые расчетные затраты по заменяющией КЭС составят

$$з^{тв}_{N} = (0{,}17 + 0{,}16)\kappa_N + \alpha_э s b h_г. \qquad (10)$$

Значительно сложнее выразить годовые эксплуатационные издержки в долях от единовременных капитальных вложений для сельскохозяйственных предприятий. Капитальные вложения при организации нового орошения состоят из вложений на мелиоративное строительство (каналы, головные сооружения, планировка полей и т. д.) и на сельскохозяйственное освоение площадей (затраты на переселение, строительство производственных, культурно-бытовых и жилых зданий, вложения на сельскохозяйственные машины и т.д.). Размеры капитальных вложений на мелиоративное освоение зависят от конкретных природных условий — топографических, почвенных, климатических, гидрологических и других и составляют обычно от 300 до 1000 *руб* на 1 *га*. В значительно больших пределах изменяются величины капитальных вложений на селскохозяйственное освоение земель. В тех случаях, когда мелиоративные мероприятия производятся на неосвоенных землях колхозов и совхозов их собственными силами, капитальные вложения по сельскохозяйственному освоению имеют незначительную величину, а в отдельных случаях могут и совсем отсутствовать. Освоение же пустынных земель может потребовать вложений 1000 *руб* и более на 1 *га* [15].

Ежегодные эксплуатационные издержки по производству сельскохозяйственной продукции на орошаемых землях

складываются также из мелиоративных и сельскохозяйственных издержек. Их суммарная величина зависит в основном от природных условий, способа орошения и вида культур, возделываемых на этих землях. Хлопчатник, например, требует бо́льшего количества поливов, чем кормовые или зерновые культуры, и больших затрат труда на обработку и уборку урожая, вследствие чего ежегодные эксплуатационные издержки на 1 *га* этой культуры значительно превосходят размеры тех же затрат по зерновым и кормовым культурам. В совхозах Средней Азии суммарные ежегодные эксплуатационные издержки на 1 *га* орошаемых площадей, занятых под хлопком, составляют примерно 400—600 руб., а по люцерне — 100—200 руб. [15]. Столь большая разница в ежегодных эксплуатационных издержках только в зависимости от вида культур, размещаемых на однотипных землях, не позволяет подметить закономерности изменения эксплуатационных издержек от величины осваиваемого массива орошения, хотя в каждом конкретном случае для принятого севооборота на массиве она может иметь место. При конкретном проектировании определение этой зависимости не представит особых затруднений. В общем же случае для определения удельных среднегодовых расчетных затрат по сельскохозяйственным предприятиям придется пользоваться формулой

$$з_{га}=0{,}1к_{га}+с_{га}. \qquad (11)$$

§ 7. Исходные положения для выбора параметров комплексного водохозяйственного объекта

Приступая к проектированию сооружений отдельных компонентов комплекса, нужно иметь представление хотя бы о главнейших чертах программы окончательного использования всех ресурсов реки и бассейна в целом с тем, чтобы с самого начала проектирования избежать решений, которые не были бы увязаны с окончательным планом общего освоения бассейна и не снижали бы его экономической эффективности.

Решая вопросы выбора параметров сооружений комплексного объекта в соответствии с его компоновкой по схеме полного освоения источника, ко взаимной увязке интересов отдельных компонентов ирригационно-энергетического комплекса можно подходить с учетом следующих соображений:

1. Снижение роли гидроэнергетики в проектируемом комплексном объекте (уменьшение гарантированной мощности и выработки электроэнергии ГЭС на уровне полного освоения компонентов комплекса) и более полное удовлетворение

требований ирригации в году расчетной для нее обеспеченности (в общем случае это будет увеличение проектной площади орошения) потребует в конечном счете увеличения в энергосистеме мощности и выработки электроэнергии тепловых электростанций. Народнохозяйственные затраты по ГЭС за расчетный период ее эксплуатации, включающие единовременные капиталовложения и эксплуатационные издержки за этот период, меньше, чем по заменяющим ее тепловым электростанциям (в противном случае ГЭС вообще не должна строиться), и, следовательно, уменьшение мощности ГЭС приводит к перерасходу средств в энергосистеме. Чем больше воды будет передано ирригации, тем ниже будет гарантированная мощность и выработка энергии ГЭС и тем большим будет перерасход средств в энергосистеме. В каждом конкретном случае рассматриваемой ГЭС и энергосистемы может быть получена зависимость величины перерасхода средств $\Delta З$ от расходов воды на орошение W (кривая 1 на рис. 2).

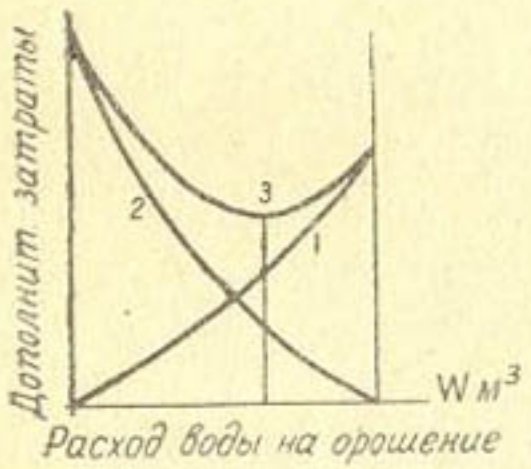


Рис. 2. Схема расчетных построений к определению параметров ирригационно-энергетического объекта.

2. Ограничение сельскохозяйственных потребителей воды вызовет необходимость уменьшить проектную величину площади, подлежащей орошению из данного водного источника. Для компенсации этого уменьшения требуются дополнительные затраты на разработку мероприятий по отысканию и освоению других источников орошения (подземный сток, другая река и т. п.) или на освоение равнопродуктивных площадей в другом бассейне. Чем большим будет ограничение сельского хозяйства в воде, тем большие потребуются дополнительные затраты. Для каждой оросительной системы можно построить зависимость величины дополнительных затрат орошения $\Delta З_{ор}$ от расходов воды на ирригацию в рассматриваемом бассейне (кривая 2 на рис. 2).

3. Всякое компромиссное решение вопроса использования водного источника, т. е. попытка удовлетворить требования на воду со стороны энергетики и ирригации на расчетном уров-

не их развития, вызывает необходимость дополнительных затрат у обоих компонентов комплекса. С народнохозяйственной точки зрения, решение будет оптимальным, если оно обеспечит минимум суммарных дополнительных затрат (капитальных вложений и ежегодных издержек производства). Суммарные дополнительные затраты в комплексе в зависимости от расходов воды на орошение изобразятся на рис. 2 кривой 3. Минимум этой зависимости покажет наивыгоднейшее распределение воды между сельским хозяйством и энергетикой и определит соответствующие этому распределению параметры ГЭС и площади орошения.

В некоторых случаях компоновки комплексного ирригационно-энергетического объекта определение дополнительных затрат в сельском хозяйстве и энергетике является весьма сложной и трудоемкой задачей. Так, например, в случае комплексного объекта, имеющего общие для орошения и энергетики сооружения (плотину, водохранилища, каналы и т. д.), для определения дополнительных затрат по компенсации снижения мощности компонентов комплекса необходимо предварительно решить весьма сложную дополнительную задачу распределения затрат по общим сооружениям, практически не имеющую еще общепризнанного метода.

В подобных случаях удобнее искать минимум капитальных вложений и ежегодных издержек производства по комплексу в целом. Откладывая на оси абсцисс количество воды, выделяемой для орошения сельскохозяйственных площадей (или для гидроэнергетики), а по оси ординат затраты за расчетный период эксплуатации (или средние за один год), можно получить серию кривых, характеризующих собой зависимость затрат от потребления воды ирригацией или гидроэнергетикой (рис. 3):

1 — в общие сооружения комплекса (плотину, водохранилище и др.), параметры которых максимально удовлетворяют требованиям обоих компонентов;

2 — в ГЭС (без вложений в общие с ирригацией сооружения);

3 — в заменяющие КЭС;

4 — в освоение сельскохозяйственных площадей, орошаемых из данного водного источника;

5 — в заменяющие площади или источники орошения;

6 — зависимость суммарных вложений в энергетику и сельское хозяйство, построенная путем графического суммирования зависимостей 1, 2, 3, 4, и 5. Минимум зависимости суммарных вложений в комплекс и покажет оптимум ирригационного использования стока реки.

Следует иметь в виду, что пользование осредненными значениями потребных расходов воды и народнохозяйственных затрат на каждай дополнительный киловатт мощности ГЭС, заменяющий ее КЭС и дополнительную площадь орошения при построении рис. 2 и 3 приводит к линейности основных зависимостей, и, следовательно, экстремальными значениями зависимости суммарных издержек будут крайние

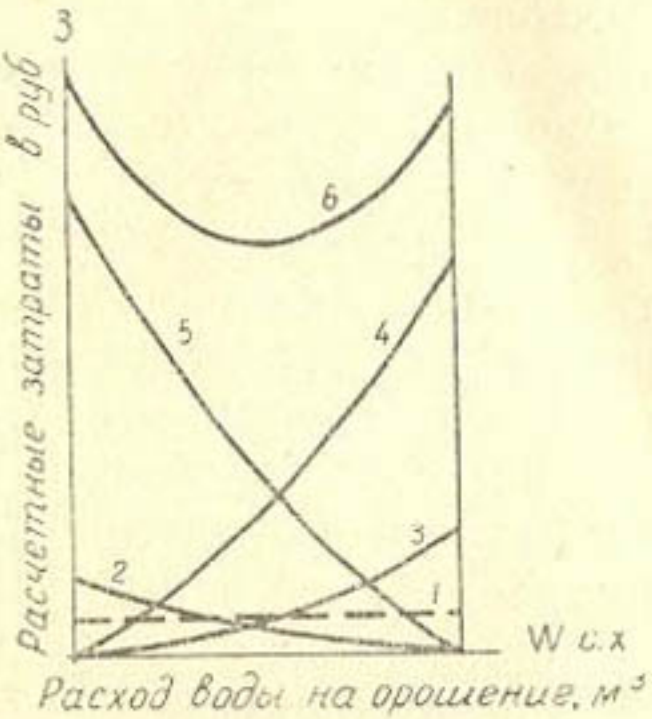


Рис. 3. Изменение затрат по комплексу в целом.

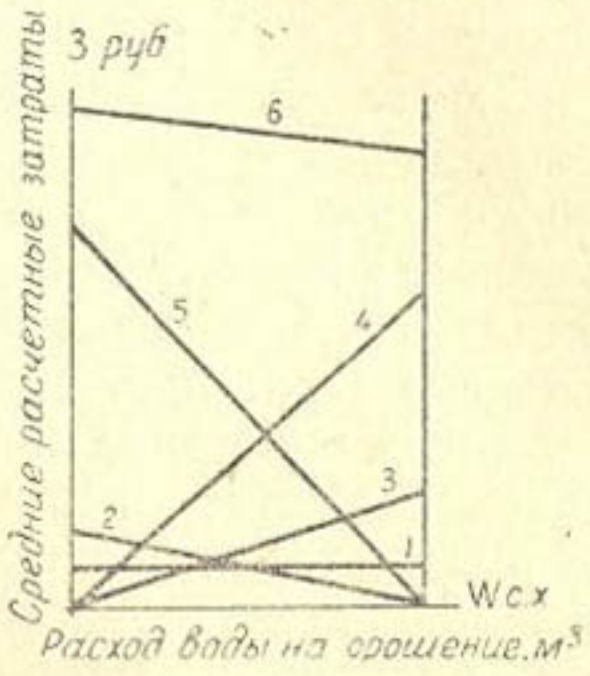


Рис. 4. Изменение осредненных затрат.

ее значения (рис. 4). В этом случае не получится компромиссных решений удовлетворения требований компонентов комплекса, наивыгоднейшим будет полное удовлетворение требований одного из них (сельского хозяйства на рис. 4). Из сказанного можно сделать весьма важный вывод о том, что компромиссные решения возможного удовлетворения требований обоих компонентов ирригационно-энергетического комплекса (в засушливых районах это ущемление интересов ирригации в пользу гидроэнергетики) будет приводить к относительно небольшой экономии народнохозяйственных затрат, в практических расчетах распределения воды между сельским хозяйством и гидроэнергетикой таких решений очень часто не будет вообще.

Исходя из полученного таким образом оптимального значения величины используемого орошением стока, могут быть подсчитаны все остальные параметры комплексного объекта: сток, используемый ГЭС в течение невегетационного периода, ее оптимальная рабочая и установленная мощность,

площадь проектируемого массива орошения. Однако все эти параметры будут соответствовать оптимуму только для одного вполне определенного расчетного уровня развития энергосистемы и сельского хозяйства. Другому уровню их развития в общем случае будут соответствовать другие оптимальные параметры. Динамика изменения оптимального значения параметров ГЭС и орошения может быть выявлена путем их подсчета тем же методом, но для нескольких расчетных уровней с интервалами в 5—10 или более лет в зависимости от темпов развития компонентов комплекса.

Обычно считается, что развитие орошения во времени йдет по пути освоения массивов, требующих последовательно все больших и больших трудовых затрат (хотя в действительности имеется и обратная тенденция — удешевление производства строительных работ, выявление возможностей освоения крупных эффективных объектов, экономически не доступных на ранних стадиях развития отрасли, и т. д.). При такой постановке вопроса заменяющее (дополняющее) орошение, если рассматривать динамику его изменения, будет все более и более дорогим, что в случае тех же условий приведет к последовательному перераспределению стока реки в пользу ирригации. Экономически оправдываемые значения специальных попусков воды для гидроэнергетики будут уменьшаться. Какова же при этом судьба ГЭС? Если на первом расчетном уровне ГЭС может выступать как источник гарантированной мощности и энергии в течение всего года, то в последующем она станет источником только гарантированной пиковой мощности и гарантированной сезонной энергии. Учитывая существующую тенденцию изменения графиков нагрузки энергосистем к увеличению их пиковости, с одной стороны, и увелучения летних нагрузок за счет технической реконструкции сельского хозяйства, а также освоения им земель с электромашинным подъемом воды на орошение — с другой, можно прийти к выводу о том, что учет динамики развития энергетики и сельского хозяйства приведет не столько к количественным, сколько к качественным изменениям мощности и выработки энергии ГЭС. Качественные измения (например, использование максимальной мощности ГЭС не зимой, а летом или перенос части выработки энергии с зимы на лето) не изменят параметров ГЭС и не приведут к потере капитальных вложений (имеются в виду вложения на возможную не используемую в последующем мощность). Не приведет к потере вложений и количественное изменение рабочей (недублируемой) мощности ГЭС, если на всех расчетных уровнях она останется меньше

установленной. Единственно опасный случай, когда экономически обоснованное снижение величины специальных попусков воды для гидроэнергетики в течение невегетационных периодов в динамике развития энергосистемы и сельского хозяйства приведет к снижению рабочей мощности ГЭС, а в системе не оправдывается дублирование ее мощности. В этом исключительном и практически весьма маловероятном случае установка максимальной мощности ГЭС, оправдываемой только на первом расчетном уровне, должна быть обоснована особо. Такое обоснование может быть выполнено путем сопоставления возможной потери капитальных вложений на ГЭС и экономии, получаемой в энергосистеме. Так, если на первом расчетном уровне экономически оправдывается установленная мощность ГЭС $N'_{\text{г}}$, а на втором $N''_{\text{г}}$, то возможная потеря капиталовложений будет составлять

$$\Delta K_{\text{г}} = \kappa^{\text{г}}{}_{N} \Delta N_{\text{г}} \quad ,$$

где $\kappa^{\text{г}}{}_{N}$ — удельные капиталовложения на дополнительный киловатт мощности ГЭС;

$$\Delta N_{\text{г}} = N'_{\text{г}} - N''_{\text{г}}.$$

Экономия от использования этой дополнительной мощности за период между первым и вторым расчетными уровнями Δt лет будет складываться:

1) из сэкономленных за это время затрат на топливо

$$З_{\text{т}} = \Delta Э_{\text{г}} \alpha_{\text{э}} sb,$$

где $\Delta Э_{\text{г}}$ — дополнительная выработка энергии ГЭС за Δt;

$\alpha_{\text{э}}$ — коэффициент сопоставимости энергии ГЭС и заменяющей ее КЭС;

s — стоимость заменяемого топлива;

b — удельный его расход;

2) из снижения ежегодных эксплуатационных издержек на ГЭС по сравнению с заменяющей КЭС, равных в среднем

$$З_{\text{экс}} = \Delta N_{\text{г}} (0{,}5 \alpha_{N} c_{\text{т}} - c_{\text{г}}) \Delta t,$$

где α_{N} — коэффициент сопоставимости мощности ГЭС и заменяющей КЭС;

$c_{\text{т}}$ — ежегодные эксплуатационные издержки 1 *квт* КЭС (без затрат на топливо);

$c_{\text{г}}$ — то же ГЭС;

3) из меньшего «замораживания» капитальных вложений при установке более дешевой мощности ГЭС

$$\Delta K_э = \sum_{i=1}^{i=n} (\Delta K_{II} - \Delta K_{iI})E,$$

где ΔK_{II} — дополнительные капитальные вложения в заменяющую КЭС при отказе от установки на ГЭС мощности $\Delta N_г$;

$\Delta K_{iI} = \Delta K_г + K_{ti}$ — дополнительные капитальные вложения в ГЭС при установке на ней мощности $\Delta N_г$ и в заменяющую КЭС для компенсации снижения мощности ГЭС к середине i-того года ее эксплуатации (рис. 5);

n — число лет, в течение которых выравниваются капитальные вложения рассматриваемых вариантов;

E — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

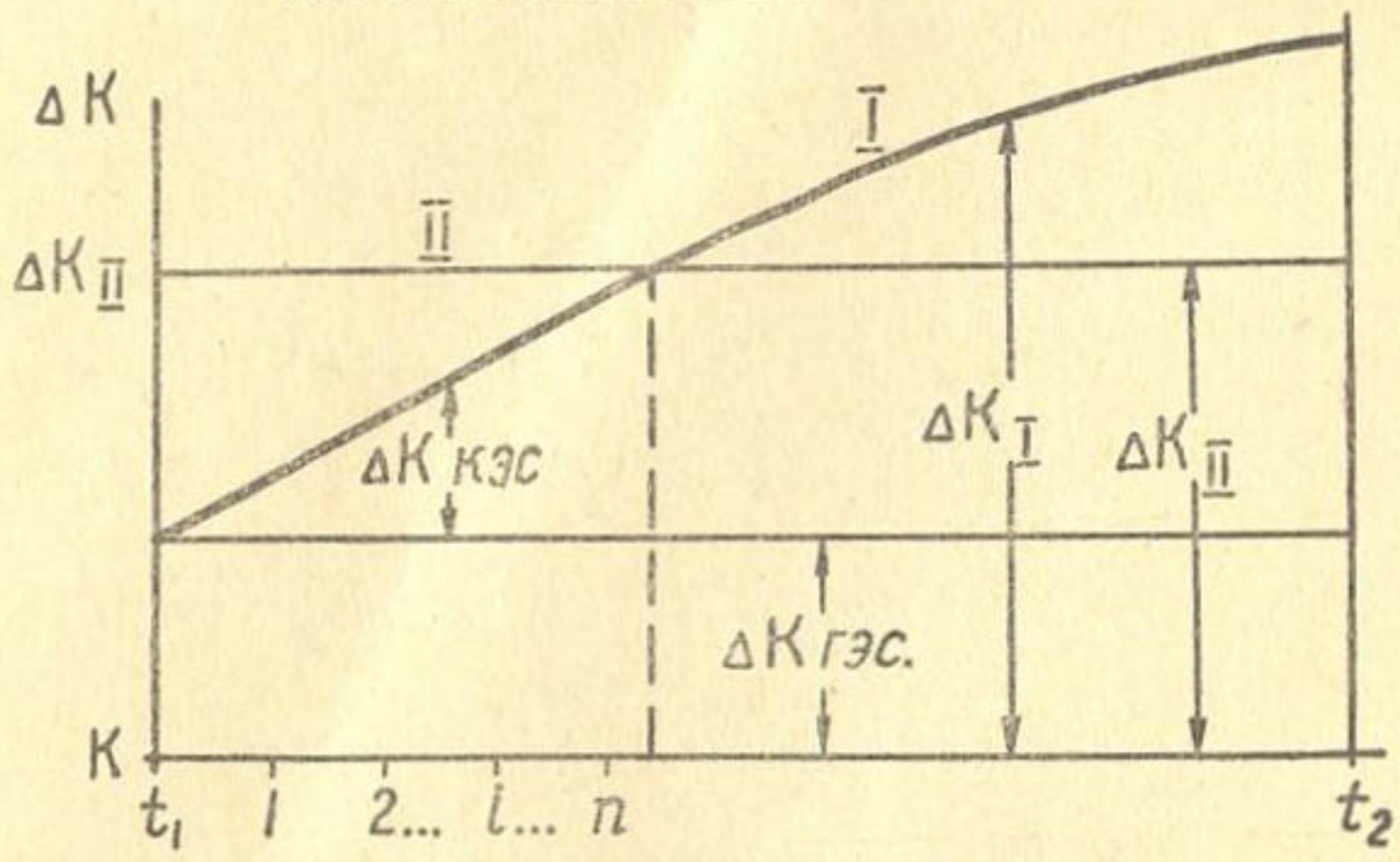


Рис. 5. Динамика изменения капитальных вложений по вариантам: I — на ГЭС к первому расчетному уровню t_1 устанавливается полная мощность $N'_г$ с последующей компенсацией ее снижения, наращиванием тепловой мощности; II — на уровне t_1 устанавливается мощность ГЭС, равная $N_г$, и дополнительная мощность ТЭС — $\alpha_N \Delta N_г$

К первому расчетному уровню следует устанавливать полную мощность ГЭС ($N_г^1$), если $\Delta K_г < З_т + З_{экс} + \Delta K_э$ или

$$\kappa^{r}_{N}\Delta N_{г}<\Delta Э_{г}\alpha_{э}sb+\Delta N_{г}(0{,}5\alpha_{N}\,c_{т}-c_{г})\Delta t+\sum^{n}_{1}(\Delta K_{II}-\Delta K_{iI})E.$$

В подобных случаях необходимо дополнительно тщательно изучить все возможности использования высвобождающейся мощности ГЭС (в качестве кратковременнного аварийного резерва, компенсатора реактивной нагрузки системы и т. д.). Это уменьшит величину потерь капитальных вложений на ГЭС ($\Delta K_{г}$).

§ 8. Принципы распределения воды между компонентами комплекса в условиях их эксплуатации

Вопросы распределения воды при комплексном ирригационно-энергетическом использовании источника до сих пор еще не получили теоретической разработки. Обычно они решаются директивно в пользу ирригации, причем без какого-либо технико-экономического обоснования, что, естественно, не может быть оптимальным для всех случаев. Это не способствует поискам резервов повышения эффективности использования воды в сельском хозяйстве и часто приводит к народнохозяйственному ущербу. Планы подачи воды на орошение, как правило, перевыполняются, хотя это в большинстве случаев не дает положительного эффекта, гидроэлектростанции же снижают свою выработку.

В условиях эксплуатации комплексных ирригационно-энергетических объектов задача распределения воды между компонентами комплекса на предстоящий вполне определенный период времени (год, паводок, межень или вегетационный период) может возникнуть в случае избыточной приточности и в случае дефицита воды.

Когда прогнозом предсказывается водность реки выше расчетной, следует стремиться получить от компонентов комплекса максимальный экономический эффект при использовании ими избыточной приточности. Для сбалансированной энергетической системы дополнительный приток воды к гидроэлектростанциям повышает надежность электроснабжения, дает возможность увеличить выработку гидроэнергии и тем самым снизить выработку тепловых электрических станций, экономя на них топливо. Зависимость экономии топлива (или соответствующих денежных средств) в энергосистеме от величины дополнительно поданной воды ГЭС может быть выражена графически (кривая 1 на рис. 6).

Дополнительная подача воды на орошение улучшает условия эксплуатации оросительных систем и в некоторых пределах повышает урожайность сельскохозяйственных

культур. Величина экономического эффекта в сельскохозяйственном производстве в зависимости от количества поданной воды на ГЭС в каждом конкретном случае оросительной системы может быть выражена графически (кривая 2 на рис. 6). Область максимума зависимости суммарного экономического эффекта от использования дополнительной (сверхплановой) воды в сельском хозяйстве и энергетике (кривая 3 на рис. 6) и покажет наивыгоднейшее распределение дополнительной воды между ними.

Однако использование сверхплановой воды сельскохозяйственными предприятиями в практике встречает ряд трудностей: недостаток рабочей силы, ограниченное количество освоенной под орошение площади и т. д. Использование воды при этом ухудшается. Иногда подача сверхплановой воды в хозяйства приводит к ущербу: образованию оврагов в местах сброса излишков воды, засолению и заболачиванию нижележащих земель. Учитывая все это, «Примерные правила технической эксплуатации оросительных систем МСХ СССР» [30] просто не рекомендуют делать такие сверхплановые подачи. Это позволяет сделать вывод о том, что при комплексном ирригационно-энергетическом использовании реки возможные избытки воды необходимо передавать гидроэнергетике.

При дефиците воды (в критически маловодный год или если в энергосистеме произошли внеплановые изменения, вызвавшие дефицит электроэнергии) распределение ее между компонентами комплекса должно обеспечить минимум суммарного ущерба от ее недостатка.

Ограничение сельскохозяйственных потребителей воды приводит к необходимости снижать оросительные нормы или сушить отдельные менее ценные культуры. Снижение оросительных норм и посушки приводят к снижению урожайности и ущербу от недовыработки сельскохозяйственной продукции, непроизводительного использования рабочей силы и механизмов. Величина ущерба определяется целым рядом факторов: ценностью ограничиваемой в воде культуры, длительностью и глубиной ограничения, фазой развития культуры в период ограничения и т. д., поэтому в каждом конкретном случае дефицита воды в сельском хозяйстве должны быть разработаны правила ограничения, приводящие к минимуму ущерба. Зависимость минимальных ущербов от величины ограничения в воде сельскохозяйственных потребителей может быть при этом выражена графически (кривая 1 на рис. 7).

Недодача воды гидроэлектростанциям снижает выработку энергии. Ущерб от этого испытывает прежде всего энергосистема, повышая до возможных пределов выработку энергии

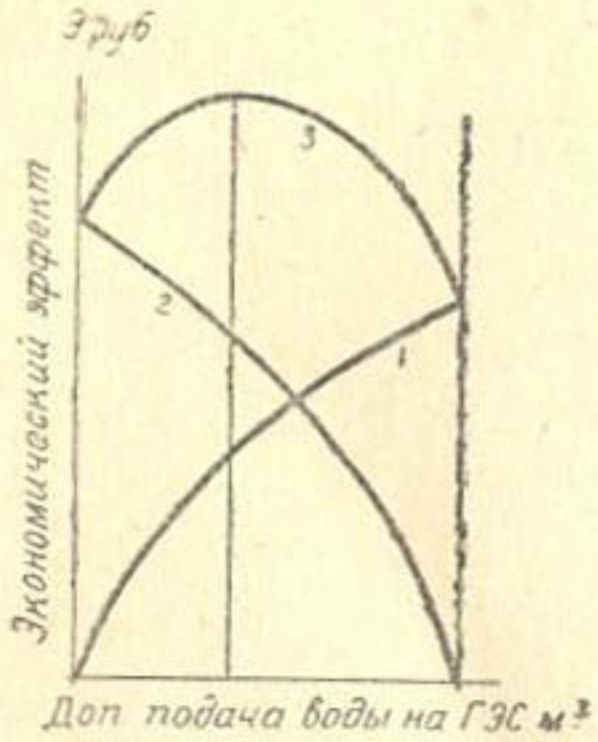


Рис. 6. Схема расчетных построений к распределению избытков воды между компонентами комплекса

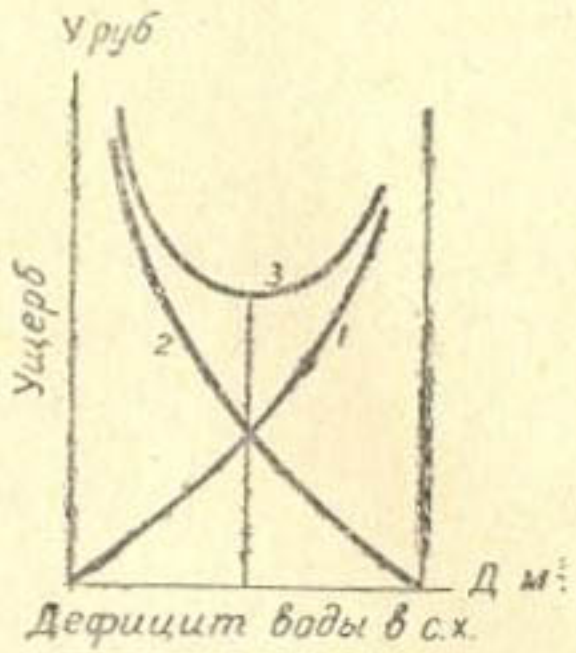


Рис. 7. Схема расчетных построений к распределению дефицита воды

на тепловых электростанциях и тем самым расходуя дополнительное количество топлива. Дальнейшее снижение выработки энергии ГЭС вызывает необходимость ограничивать энергоснабжение потребителей энергии, что приводит к ущербу от недовыработки продукции, брака, непроизводительного использования рабочей силы и оборудования. Зависимость ущерба в производственно-энергетической системе от недовыработки энергии на ГЭС (от недодачи воды ГЭС) также может быть выражена графически (кривая 2 на рис. 7).

Минимум зависимости суммарного ущерба в сельском хозяйстве и производственно-энергетической системе (кривая 3 на рис. 7) покажет наивыгоднейшее распределение дефицита воды между ирригацией и гидроэнергетикой.

ГЛАВА II

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПРИ ВЫБОРЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОРОШЕНИЯ

§ 1. Исходные положения

Специфическим недостатком рек как источников орошения является непостоянство их оросительной способности в годы различной водности. Из одного и того же источника в многоводные годы можно оросить большие площади сельскохозяйственных угодий, чем в маловодные. При выборе в качестве расчетной высокой обеспеченности* орошения (ориентация на маловодные годы) недостаточно полно используются водные ресурсы реки (и без того недостаточные в засушливых районах страны), но не имеют места недополивы и посушки посевов. При понижении обеспеченности использование водных ресурсов улучшается, но снижается надежность орошения сельскохозяйственных культур, ухудшается использование техники, рабочей силы.

В существующей практике проектирования оросительных систем расчетный расход водоисточника и все вытекающие из него параметры оросительной системы и хозяйства выбираются исходя из принимаемого (на основании нормативов или рекомендаций различных авторов) коэффициента обеспеченности орошения. При заданном нормативе обеспеченности величина соответствующей ему площади орошения без особого труда определяется из зависимости ее от водообеспеченности источника (рис. 8). При этом насколько правильно выбрана величина коэффициента обеспеченности, настолько экономическая эффективность всего проектируемого сельскохозяйственного мероприятия будет соответствовать оптимальному ее значению. При обеспеченности выше оптимальной ухудшаются удельные экономические показатели ороше-

---

* Под термином «обеспеченность орошения» понимается число лет из ряда наблюдений (в процентах) или число случаев из ста, когда подача воды оросительной системой на поля сельскохозяйственных угодий не будет меньше заданного ее значения.

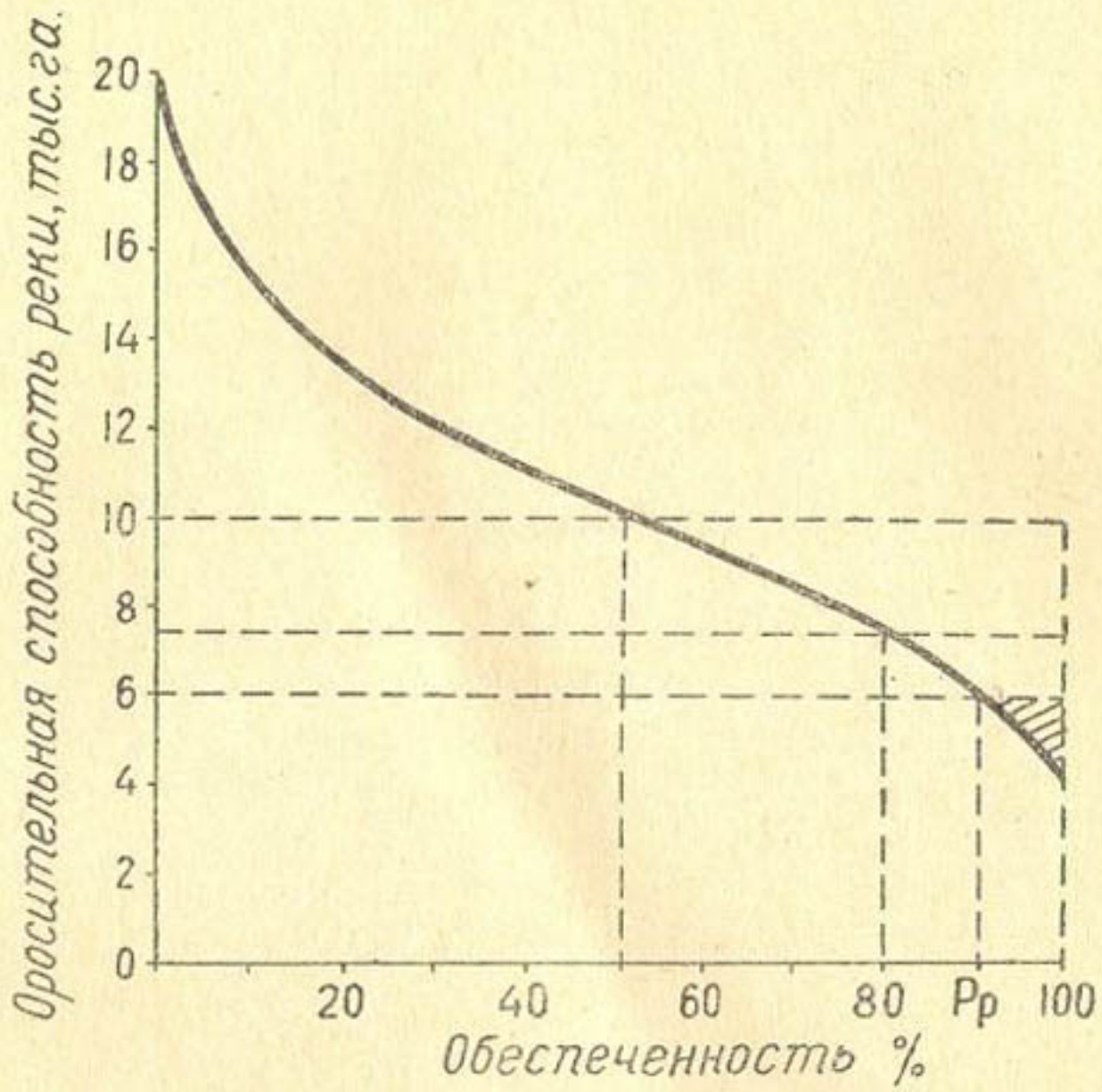


Рис. 8. Кривая обеспеченности площади орошения из проектируемого источника

ния, требуются дополнительные затраты на развитие орошения из других источников; при пониженной обеспеченности очень плохо используются капитальные вложения в дополнительные площади, орошаемые только в многоводные годы.

Норматив обеспеченности орошения принимается в настоящее время равным 50% [8]. Имеются предложения по изменению его, но рекомендации различных авторов настолько разноречивы (от 25—30% до 90% и выше, см. обзор литературы в [48]), что выбрать из них один наиболее признанный не представляется возможным. Учитывая же, что орошаемые земли в СССР располагаются в самых разнообразных климатических, почвенных, гидрологических и других условиях и могут иметь самые различные экономические показатели, вряд ли вообще возможно предложить для них единый норматив обеспеченности орошения. В каждом конкретном случае обеспеченность должна быть выбрана расчетным путем с учетом всех местных природных и экономических показателей. При этом проблема расчетной обеспеченности орошения возникает в основном в районах с ограниченными водными и неограниченными земельными ресурсами.

Там же, где не испытывается недостатка в воде, такой проблемы не возникает, ибо при любом уровне использования земельных ресурсов потребности в воде могут быть покрыты на 100%.

К настоящему времени имеется ряд предложений по определению обеспеченности орошения и расчетным путем. Анализируя эти предложения в порядке их опубликования, можно проследить всю эволюцию уточнений в расчетах этого весьма важного параметра оросительных систем и обслуживаемых ими хозяйств. Так, если первые работы (Большаков [4], Трофимов [38], Папелишвили [27], Кан Пу-цин [17] и др.) рекомендуют определять обеспеченность орошения на основе анализа только гидрологических и технических показателей оросительных систем, то последующие (Чеботарев [42], Саваренский [32], Мартиросян [23], Шавва [48] и др.) вводят в решение этого вопроса и экономические показатели сначала только оросительной системы, а затем и обслуживаемого ими хозяйства. Наиболее поздней методической работой по определению расчетной величины коэффициента обеспеченности орошения является работа К. И. Шаввы. Однако и она требует уточнений, потому что все еще не позволяет учесть такие весьма важные факторы, оказывающие существенное влияние на величину обеспеченности, как регулирование стока; сохранение части урожая (неполную его гибель) на неполиваемых или поливаемых меньшими оросительными нормами площадях в маловодные годы; прямые потери хозяйств при недополивах (потери части труда, урожая, семян, омертвление техники, рабочей силы и др.); затраты на хранение резервируемой продукции и т. д. Следует отметить и громоздкость расчетов более точным табличным методом, предложенным К. И. Шаввой.

В связи с различием в подходе к решению поставленной задачи расчеты обеспеченности методами различных авторов дают разные результаты для одних и тех же условий орошения [48]. Однако анализ имеющихся в этой области работ позволяет с уверенностью сказать, что обеспеченность орошения не может быть единой заданной, а должна быть искомой величиной, требующей экономического обоснования; расчетная обеспеченность орошения определяет параметры как водохозяйственной установки, так и сельскохозяйственного предприятия в целом, и, следовательно, ее величина должна определяться из условия их совместного оптимального развития.

В связи с наличием в СССР двух форм собственности сельскохозяйственных предприятий — государственной и колхозно-кооперативной —

необходимо разработать и две методики выбора их водообеспеченности: для государственных оросительных систем и для небольших колхозных, сооружаемых на их собственные или заемные средства.

В основу методики выбора расчетной обеспеченности государственных оросительных систем должен быть положен принцип достижения минимума затрат (единовременных капитальных вложений и ежегодных эксплуатационных издержек) на производство заданного планом развития народного хозяйства количества и вида сельскохозяйственной продукции.

Методика же для колхозных оросительных систем должна иметь в основе принцип максимальной доходности хозяйства от вкладываемых им на орошение средств. Собственные капитальные вложения колхозов в создание новых и развитие существующих оросительных систем делаются в основном с целью увеличения их доходов. Поэтому величина прироста дохода является в этом случае главным критерием для определения экономической эффективности вложений.

§ 2. Выбор расчетной обеспеченности государственных оросительных систем

Основной задачей при проектировании новых предприятий для производства дополнительной сельскохозяйственной продукции является выбор таких их параметров, при которых необходимый прирост производства планируемой продукции будет получен с наименьшими затратами. Учитывая, что потребности в дополнительной продукции в целом по стране всегда превышают возможности производства ее отдельным предприятием, минимум затрат должен быть найден для суммы предприятий: проектируемого и дополняющего. Рассмотрим величину этих затрат при нескольких значениях обеспеченности орошения. Так, если потребности в площади нового орошения для производства заданного количества дополнительной продукции составляют F *га*, то суммарные затраты сельского хозяйства, необходимые для производства этой продукции в течение расчетного срока эксплуатации T при площади проектируемого массива орошения F_{100}, соответствующей 100% обеспеченности, составят

$$З = З_0 + (\bar{к} + \bar{с}T) F_{100} + \lambda(\bar{к}_3 + \bar{с}_3 T)(F - F_{100}),$$

где $З_0$ — затраты сельского хозяйства, не зависящие от обеспеченности проектируемого массива орошения, *руб/год;*

$\bar{к}$; $\bar{с}$ — средние удельные единовременные капитальные вложения и ежегодные издержки эксплуатации по проектируемому массиву орошения, *руб/га;*

$\overline{к_з}$; $\overline{с_з}$ — то же по заменяющему (дополняющему) массиву орошения. В качестве заменяющего (дополняющего) рассматривается массив, который подлежит освоению под ту же, профилирующую для проектируемого массива культуру, но имеющий худшие экономические показатели и поэтому осваиваемый во вторую очередь;

F_{100} — площадь проектируемого массива орошения, соответствующая 100% обеспеченности, *га;*

λ — соотношение урожайности профилирующей культуры *ц/га* на проектируемом и заменяющем массивах.

Если же увеличить площадь проектируемого массива, например, на 1 *га* сверх F_{100}, то обеспеченность орошения этого гектара будет $p<100\%$, а суммарные затраты в сельском хозяйстве станут равными

$$З' = З_0 + (\overline{к} + \overline{с}T) F_{100} + \Delta З' + \Delta З'_{ущ} + \lambda(\overline{к_з} + \overline{с_з}T)(F - F_{100}) - \Delta З''_з$$

где $\Delta З^1$ — величина дополнительных затрат сельского хозяйства, связанных с освоением дополнительного гектара на проектируемом массиве орошения, равная $к + cTp$;

$к$ — единовременные капитальные вложения в освоение дополнительного гектара;

$с$ — его ежегодные эксплуатационные издержки в рабочем (водообеспеченном) году;

p — доля периода Тлет, в течение которой орошение дополнительного гектара обеспечивается;

$\Delta З'_з$ — соответствующее снижение затрат по заменяющему массиву орошения, равное $\lambda(к_з + с_з T)$;

$\Delta З'_{ущ}$ — суммарный ущерб от недоиспользования дополнительного гектара в течение $(1-p)T$ маловодных лет.

Этот ущерб складывается:

1) из дополнительных затрат, необходимых для компенсации возможной недовыработки сельскохозяйственной продукции на этом гектаре в засушливые годы. Общая недовыработка продукции за $(1-p)T$ маловодных лет составит $аУ(1-p)T$, где $а$ — величина погибающего урожая при посушке гектара в маловодном году, выраженная в долях от полного $(У)$. Для компенсации этого снижения производства сельскохозяйственной продукции и балансирования ее с потреблением на заменяющем массиве все же придется освоить дополнительную площадь $\Delta F = \frac{аУ(1-p)Т}{У_з Т}$. При этом пред-

полагается, что эта дополнительная площадь будет иметь 100% водообеспеченность. Освоение дополнительной площади потребует соответствующих затрат

$$\Delta F(\kappa_3+c_3T);$$

2) из затрат на хранение продукции до наступления маловодья. Резерв продукции $aУ(1—p)T$, вырабатываемой равномерно в течение всех лет на заменяющем массиве, подлежит хранению до наступления периода маловодных лет на проектируемом массиве. Если ежегодные затраты на хранение продукции составляют з $_x$ *руб/ц*, то общие затраты хранения будет равны*

$$(0{,}4\div 0{,}5)\,TaУ\,(1—p)\,Tз_x\ ;$$

3) из потерь эксплуатационных издержек. Недоиспользование дополнительного гектара в течение $(1—p)T$ маловодных лет приводит к «замораживанию» средств, вложенных в его освоение, недоиспользованию сельскохозяйственного оборудования, машин и рабочей силы, предусмотренных на его обработку, а при плохом прогнозе маловодья и к потере семян, некоторого количества затраченного труда и т. п. Если принять, что этот ущерб от недоиспользования гектара в маловодном году составляет долю δ эксплуатационных издержек нормального рабочего года, то за $(1—p)T$ маловодных лет ущерб составит

$$\delta c(1—p)T.$$

Ясно, что понижать расчетную обеспеченность орошения проектируемого массива ниже 100% целесообразно только в том случае, если при этом произойдет снижение суммарных затрат сельского хозяйства, т. е. если $З'$ будет меньше $З$, или

$$\Delta З'+\Delta З'_{ущ}—\Delta З'_з<0.$$

$$\kappa+cTp+a\lambda\,(1—p)\,(\kappa_3+c_3T)+0{,}45TaУ\,(1—p)\,Tз_x+$$
$$\delta c\,(1—p)\,T—\lambda(\kappa_3+c_3T)<0.$$

Целесообразность освоения еще одного дополнительного

---

* В данном случае учитываются средние значения затрат хранения за расчетный период Т. Однако такой подход не совсем справедлив в случаях значительного удельного веса в общих затратах хранения единовременных капитальных вложений на сооружение складов и явно выраженной синхронности в наступлении маловодья на оросительных системах смежных рек. В подобных случаях коэффициент общих затрат хранения должен быть повышен до 0,7—0,9.

гектара на проектируемом массиве может быть доказана условием $З'' < З'$.

$$З'' = З_0 + (\bar{к} + \bar{c}T) F_{100} + \Delta З' + \Delta З'' + \Delta З'_{ущ} + \Delta З''_{ущ} + \\ + \lambda (к_з + c_з T) (F - F_{100}) - \Delta З'_з - \Delta З''_з.$$

или $\Delta З'' + \Delta З''_{ущ} - \Delta З''_з < 0$ и т. д.

Снижение суммарных затрат сельского хозяйства при освоении каждого нового дополнительного гектара на проектируемом массиве орошения будет все меньшим и меньшим вследствие постепенного снижения водообеспеченности каждого дополнительного гектара и увеличения ущербов от его недополива. В пределе, при минимуме суммарных затрат, прирост их снижения станет равным нулю, а обеспеченность, соответствующая этому условию, должна стать расчетной:

$$\Delta З^{расч} + \Delta З_{ущ}^{расч} - \Delta З_з^{расч} = 0.$$

$$\text{или } к + cTp_{расч} + a\lambda(1 - p_{расч})(к_з + c_з T) + 0{,}45aУ(1 - p_{расч})T^2 з_x + \\ + \delta c(1 - p_{расч})T - \lambda(к_з + c_з T) = 0. \qquad (12)$$

Разделив обе части равенства (12) на T и принимая $\left(\frac{1}{T}к + c\right) = з$, где $з$ — удельные среднегодовые расчетные затраты на дополнительный гектар проектируемого (соответственно $з_з$ — заменяющего) массива орошения, получим

$$з - c(1 - p_{расч}) + a\lambda(1 - p_{расч})з_з + 0{,}45aУ(1 - p_{расч})Tз_x + \\ + \delta c(1 + p_{расч}) - \lambda з_з = 0,$$

откуда

$$P_{расч} = 1 - \frac{\lambda з_з - з}{a\lambda з_з + 0{,}45aTУз_x - (1 - \delta)c}. \qquad (13)$$

Рассматривая возможные значения затрат по освоению и эксплуатации орошаемых площадей, а также ущербов от их недоиспользования в маловодные годы, можно сделать некоторые общие выводы. Так, Д. Т. Зузиком [15] приводятся следующие предельные значения удельных капитальных вложений — $к$ (в *руб/га*):

а) на строительство оросительных систем	300— 800
б) на их мелиоративное освоение	30— 50
в) на сельскохозяйственное освоение	0—1000
в сумме	330—1850

и ежегодных эксплуатационных издержек — *с*:	
а) на мелиорацию	40—100
б) сельскохозяйственные издержки (для люцерны, зерновых)	100—150
в сумме	140—250

Удельные среднегодовые расчетные затраты при нормативном коэффициенте эффективности капиталовложений в сельском хозяйстве $E=\frac{1}{T}=0{,}1$ (при $T=10$ годам) будут равны $з=Ек+с=173\div 435$ *руб/га*.

Если считать, что

1) удельная урожайность культур на проектируемом и заменяющем массивах одинакова ($\lambda=1$);

2) в маловодном году на засушиваемой площади гибнет весь урожай ($a=1$);

3) потери эксплуатационных расходов в маловодном году на засушиваемой площади составляют примерно половину соответствующих расходов нормального рабочего года ($\delta=0{,}5$);

Таблица 1

Обеспеченность государственных оросительных систем

Разность среднегодовых расчетных затрат по заменяющему и проектируемому у массивам орошения $\Delta з$ *руд/га*	Что соотзетствует разности в эксплуатационных издержках 100 ÷ 0 *руб/га* и в удельных капиловлажениях $\Delta к$ *руб/га*	Расчетная обеспеченность орошения $P_{расч}$ %
10	до 100	96—98
25	до 250	92—96
50	до 500	85—91
100	до 1000	73—83
150	500÷1500	65—75
200	1000÷1500	58—66
250	1500	52—58

4) удельные затраты долгосрочного хранения культуры, подлежащей посушкам в маловодные годы (условно сено), $з_х=0{,}5$ *руб/ц*, и урожайность ее $У=100$ *ц/га**, то можно ре-

* Примерно ту же величину затрат на хранение дают и зерновые удельные издержки хранения, по которым $з_х=2{,}5$ *руб/ц* и урожайность 20 *ц/га*.

комендовать значения расчетной обеспеченности государственных оросительных систем в зависимости от разности среднегодовых расчетных затрат по проектируемому и заменяющему (дополняющему) массивам, приведенные в табл. 1.

Как видно из приведенной таблицы, существующий ныне норматив обеспеченности орошения, равный 50%, оправдывается только для самых экономичных государственных оросительных систем при очень дорогих заменяющих (дополняющих) площадях (с капитальными вложениями более 1800 *руб/га* и ежегодными эксплуатационными издержками культур-регуляторов более 250 *руб/га*).

§ 3. Выбор обеспеченности колхозных оросительных систем

Выбор расчетной величины обеспеченности небольшой *сооружаемой на средства колхоза* оросительной системы должен исходить из принципа достижения им максимального возможного дохода от имеющегося у него земельного фонда. Из этого принципа может быть доказана целесообразность понижения расчетной обеспеченности крупной государственной оросительной системы (ниже P расч.) за счет дополнительных вложений колхозов и освоения ими свободных земель, подкомандных этой оросительной системе.

Осваивая дополнительный гектар орошаемой площади, колхоз должен будет вложить в него и развитие оросительной системы $к$ руб.. Если при этом предполагается окупить их в течение τ лет, то общие вложения за этот период составят

$$к + c\tau p + \delta(1-p)\tau c,$$

где $к$ — единовременные вложения хозяйства на полное освоение дополнительного гектара, *руб/га;*

$c\tau p$ — сумма ежегодных эксплуатационных издержек за период τp лет, *руб/га;*

p — доля периода τ, в течение которой ожидается, что орошение дополнительного гектара будет обеспечено;

$\delta(1-p)\tau c$ — ущерб хозяйства от недоиспользования дополнительного гектара в течение $(1-p)\tau$ маловодных лет, выраженный в виде доли δ от соответствующих эксплуатационных издержек нормального рабочего года, *руб./га.*

Выручка хозяйства от реализации сельскохозяйственной продукции за τ лет составит

$$У Ц \tau p + (1-a) У Ц \tau (1-p),$$

где $У$ — средняя проектная урожайность наиболее доходной культуры в хозяйстве, *ц/га* в год;

$Ц$ — государственная закупочная цена этой культуры, *руб/ц;*

a — доля погибающего урожая при посушке дополнительного гектара;

Освоение дополнительного гектара целесообразно хозяйству, если за намеченный срок τ оно окупит сделанные вложения и получит прирост дохода, составляющий

$$\Delta Д = УЦ\tau p + (1-a)УЦ\tau(1-p) - к - p\tau c - \delta(1-p)\tau c > 0.$$

По мере увеличения орошаемой из рассматриваемого источника площади абсолютная величина дохода хозяйства растет до тех пор, пока удельный прирост его на дополнительный гектар остается больше нуля. Площадь, при которой удельный прирост дохода станет равным нулю, соответствует максимуму суммарного дохода хозяйства, а обеспеченность — оптимальному (расчетному) ее значению. При этом

$$\Delta Д = УЦ\tau p^{хоз}_{расч} + (1-a)УЦ\tau(1-p^{хоз}_{расч}) - к - p^{хоз}_{расч}\tau c - \delta(1-p^{хоз}_{расч})\tau c = 0,$$

откуда

$$p^{хоз}_{расч} = \frac{к + \delta\tau c - (1-a)УЦ\tau}{aУЦ\tau - (1-\delta)\tau c} \text{ или } p^{хоз}_{расч} = \frac{E_x к + \delta c - (1-a)УЦ}{aУЦ - (1-\delta)c}, \quad (14)$$

где $E_x = \frac{1}{\tau}$ — коэффициент эффективности дополнительных капитальных вложений хозяйства, принимаемый равным $0{,}2 \div 0{,}4$ ($\tau = 5 \div 2{,}5$ года) в зависимости от его возможностей. Чем зажиточнее хозяйство, тем на более длительный срок может сделать оно капитальные вложения, тем меньшей может быть принята величина E_x.

Для хлопковых и свекловичных районов Средней Азии можно рекомендовать значения расчетной обеспеченности колхозных оросительных систем (при эффективности дополнительных капитальных вложений у них $E_x = 0{,}2$ ($\tau = 5$ лет), потере эксплуатационных расходов в маловодном году на засушиваемой площади $\delta = 0{,}5$ соответствующих затрат нормального рабочего года и полной гибели урожая при посушке $a = 1$), приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Обеспеченность колхозных оросительных систем

Капиталовложения на дополнительный гектар, *к руб/га*	$p^{хоз}_{расч}$ %	
	хлопковый район при $c = 440-600$ *руб/га* $У = 30$ *ц/га*	район свеклосеяния при $c = 400-600$ *руб/га* $У = 450$ *ц/га*
300	40— 60	30—50
500	45—65	35—55
700	50—70	40—60
1000	60—80	49—68
1500	76—100	60—80

В данном случае при подсчете возможных ущербов хозяйства принято, что в маловодные годы сушится та же культура, под которую и осваивается дополнительная площадь (или культура, требующая примерно тех же годовых эксплуатационных затрат). Это предположение основы-

вается на том, что в настоящее время осуществляется тенденция исключения из севооборотов хозяйств менее ценных культур, а если они и будут в небольших количествах, то при относительно низких обеспеченностях орошения (30—60%) в большинстве маловодных лет их просто не хватает для полной компенсации возможных дефицитов воды.

Анализируя результаты подсчетов возможных значений расчетной обеспеченности оросительных систем (табл. 1 и 2), можно сделать вывод о том, что государственные оросительные системы в большинстве своем должны иметь более высокую обеспеченность по сравнению с колхозными. Колхозные оросительные системы можно ориентировать примерно на 50% обеспеченность при вложениях на дополнительный гектар 300—600 руб.

В полученные зависимости (13 и 14) для определения расчетной обеспеченности оросительных систем не вошли характеристики самого источника орошения. Но, как показали проверочные расчеты, они оказывают влияние в основном лишь на величину оросительной способности, а не на ее расчетную обеспеченность. Наиболее распространенной рекомен-

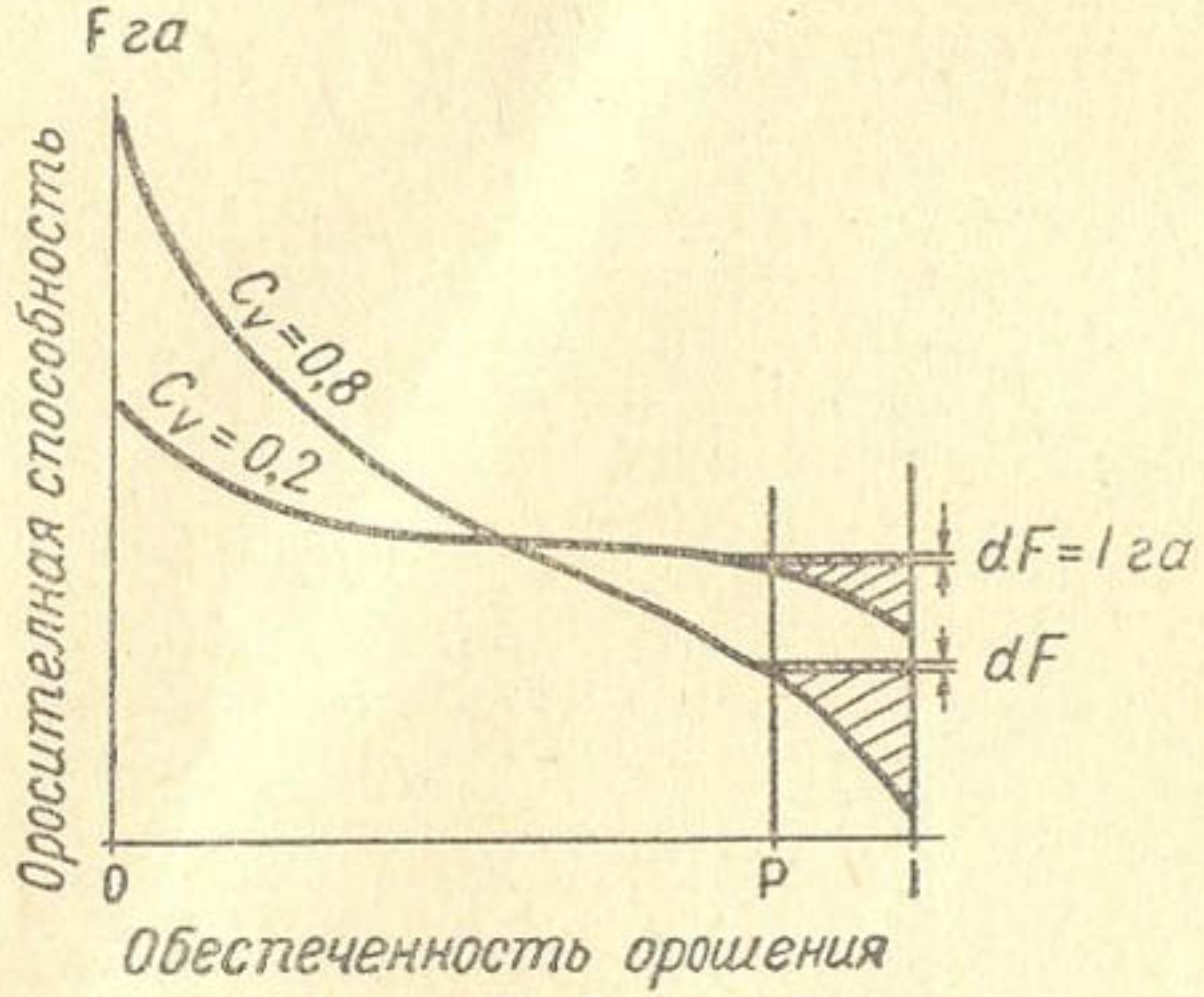


Рис. 9. Кривые зависимости оросительной способности систем от их обеспеченности. Штриховкой показана суммарная величина недополивов в критические маловодные годы; двойной штриховкой — ее прирост на дополнительный гектар.

дацией, встречающейся в литературе, является рекомендация учета при выборе расчетной обеспеченности орошения коэффициента вариации стока водоисточника C_v, оказывающего существенное влияние на величину суммарного ущерба от недополивов в системе.

На рис. 9 показаны кривые обеспеченности двух ороси-

тельных систем, имеющих одинаковую норму стока, но различные C_v. Как видно из рисунка, при одной и той же обеспеченности орошения p системы могут оросить различные площади, различными будут и недополивы в критически маловодные годы, однако прирост этих недополивов при изменении площади орошения на единицу будет практически одинаковым. Следовательно, при посушке в течение маловодных лет (независимо от глубины ограничения) одних и тех же культур в хозяйстве (или культур, приводящих примерно к одинаковому удельному ущербу в *руб/га* в год) прирост суммарного ущерба $\left(\frac{dЗ_{ущ}}{dF}\right)$, определяющий величину расчетной обеспеченности системы, останется также примерно постоянным для любой вариации стока в водоисточнике.

§ 4. Влияние внутригодового регулирования стока на величину расчетной обеспеченности орошения

Внутригодовое (сезонное) регулирование стока водоисточника орошения, как правило, имеет своей основной целью повышение его оросительной способности, что достигается за счет использования в периоды пониженных расходов воды в водоисточнике части стока, накопленной в бассейне регулирования в течение невегетационного периода и избытков в отдельные (паводочные) месяцы периода вегетации. Чем больше полезная емкость бассейна (в пределах до появления возможности полного годового зарегулирования стока), тем выше может быть оросительная способность. Следовательно, при выборе расчетной обеспеченности и определении оптимальной величины площади орошения из проектируемого источника наличие бассейна для внутригодового регулирования стока в первую очередь сказывается на расчетной зависимости оросительной способности от обеспеченности (см. рис. 8). Изменяются при этом и абсолютные экономические показатели оросительной системы. Однако удельные экономические показатели на дополнительный гектар орошения, входящие в выражения (13, 14) для определения оптимальной обеспеченности орошения, останутся практически теми же, ибо при постоянной заданной емкости регулирующих водохранилищ затраты по дополнительному гектару орошения, как и в случае без регулирования стока, будут складываться только из затрат, связанных с соответствующим 1 *га* расширением во-

дозаборного сооружения и магистрального ирригационного канала, а также мелиоративным и сельскохозяйственным его освоением.

Далее следует учесть, что наличие бассейна для внутригодового и внутривегетационного регулирования стока позволяет в маловодные перебойные годы распределять дефицит воды между сельскохозяйственными культурами и массивами в течение вегетационного периода таким образом, чтобы свести к минимуму возможные ущербы хозяйств от недополивов возделываемых ими культур.

В случае отсутствия возможностей регулирования стока дефициты воды маловодных лет сосредоточиваются, как правило, на одном небольшом дефицитном периоде, составляющем 1 — 1,5 месяца (в условиях Средней Азии обычно в конце весны — начале лета). Это приводит к срыву 1—3 поливов культур, подлежащих ограничениям в воде, и полной гибели их урожая (исключение могут составить травы, которые даже в этом случае иногда позволяют снять один укос). Величина ущерба от недополивов при этом является максимальной.

Регулирование стока позволяет рассредоточить дефицит, подать имеющуюся воду культурам тогда, когда они испытывают наибольшую потребность в ней, что помогает спасти некоторую долю их урожая и уменьшить общий ущерб хозяйства от недополивов.

Соответствующий анализ состава культур, выбор из них подлежащих ограничениям в воде в период ее дефицита и оценка реальной доли возможной гибели их урожая (величины «a» в выражениях 13, 14) — все это позволит в условиях проектирования конкретной оросительной системы более объективно подойти к выбору ее расчетной обеспеченности.

Неполная гибель урожая культур, подвергающихся посушкам (ограничениям) в маловодные годы, может оказать существенное влияние на величину расчетной обеспеченности орошения. Так, при сохранении около $^1/_4$ урожая засушиваемой культуры ($a=0{,}75$) оптимальное значение расчетной обеспеченности орошения получится на 3 — 20% ниже, чем приведено в табл. 1 и 2. Бо́льшие значения поправок при этом относятся к меньшим значениям обеспеченности.

Оценка величины гибели урожая при переходе от посушек к ограничениям оросительных норм на части или всей площади орошения представляет весьма сложную задачу. Прирост гибели урожая, относимый на дополнительный гектар проектируемой оросительной системы (a), зависит при этом от

целого ряда факторов — агротехнических, мелиоративных, почвенных, гидрологических, гидрогеологических, климатических, биологии ограничиваемых в воде растений и, наконец, чисто организационных. Точный учет всех этих факторов на стадии перспективных расчетов проектирования оросительной системы вызывает определенные трудности и представляется нецелесообразным. Однако некоторые из них, наиболее важные и постоянно действующие, должны быть учтены хотя бы приближенно.

Анализ влияния коэффициента вариации стока в источнике орошения (C_v), характеризующего и глубину возможного дефицита воды в маловодные годы, на величину прироста гибели урожая (a) и потерь эксплуатационных расходов (δ), относимых на 1 дополнительный гектар проектируемой системы в зонах, где сельскохозяйственное производство без орошения является экономически нецелесообразным при условии

наличия возможностей хорошего внутривегетационного регулирования стока;

правильного выбора величины минимума оросительных норм для культур, подлежащих ограничениям в орошении в дефицитные годы;

выбора соответствующей этим нормам площади орошения;

ограничения культур в воде в наилучшие для них сроки, позволяет сделать следующие приближенные рекомендации:

Коэффициент вариации стока в источнике орошения C_v		0,1—0,2	0,2—0,4	0,4—0,7	0,7—1,0
Доля гибели урожая (a) и потерь эксплуатационных расходов (δ) на дополнительном гектаре при ограничении в воде трав:	a	0,5—0,6	0,6—0,65	0,7	0,75
	δ	0,7	0,65	0,6	0,55
Зерновых	a	0,6—0,7	0,75	0,8	0,85
	δ	0,8	0,70	0,6	0,50

Для пустынных районов коэффициент гибели урожая a следует принимать для соответствующих значений C_v на 0,15 — 0,20 бóльшим.

Увеличение доли удельных потерь эксплуатационных расходов при переходе от посушек к ограничениям оросительных норм и регулированию стока связано при этом с использованием большей площади и понижением урожайности на ней.

Для иллюстрации пользования предлагаемыми методами

приведем пример выбора расчетной обеспеченности государственной оросительной системы.

Пусть в конкретном хозяйственном районе требуется освоить 10000 *га* площади сельхозугодий. Оросительная способность реки, из которой проектируется орошение данного массива, показана на рис. 8. Полное освоение (сельскохозяйственное и мелиоративное) любого дополнительного гектара при этом требует 1000 *руб/га* единовременных капитальных вложений — $к$ и 250 *руб/га* ежегодных эксплуатационных издержек — $с$.

Заменяющий источник орошения (предположим, что орошение этого массива возможно подземными водами) требует соответственно $к=800$ *руб/га*; $с=320$ *руб/га*.

Расчетный срок эксплуатации (окупаемости капитальных вложений) $T=10$ лет.

В маловодном году будут засушиваться зерновые, имеющие урожайность 20 *ц/га*, при посушке погибнет весь урожай на гектаре и потеряется около половины эксплуатационных издержек нормального рабочего (водообеспеченного) года. Стоимость хранения зерновых 2,5 *руб/ц* в год.

Тогда по формуле (13) определяем

$$p_{расч}=1-\frac{(\frac{1}{10}800+320)-(\frac{1}{10}1000+250)}{(\frac{1}{10}800+320)+0{,}45\cdot10\cdot20\cdot2{,}5-0{,}5\cdot250}=0{,}9$$

или 90 %.

Этой обеспеченности соответствует площадь 6000 *га* (см. рис. 8), остальные 4000 *га* должны будут орошаться за счет откачки подземных вод.

Легко убедиться, что подобное распределение площади между источниками орошения соответствует минимуму затрат на производство сельхозпродукции на этом массиве.

За 10 расчетных лет эксплуатации при таком распределении массива между источниками орошения затраты по проектируемой оросительной системе и подвешенной к ней площади составят $З_{пэ}=F_{пэ}(к+cT)-0{,}5(1-p)Tc\Delta F_д=$

$=6000\cdot(1000+250\cdot10))-0{,}5\cdot0{,}1\cdot10\cdot250\cdot800=20{,}9$ млн руб.

$\Delta F_д$ — средняя площадь, недополиваемая в течение маловодных лет (см. рис. 8).

Недовыработка продукции за этот период составит

$$D=\Delta F_д У(1-p)T=800\cdot20\cdot0{,}1\cdot10=16000\ ц;$$

затраты хранения—

$З_{хр}=0{,}45Dз_x T=0{,}45\cdot16000\cdot2{,}5\cdot10=0{,}18$ млн руб.;

потребная площадь орошения подземными водами —

$$F_{зам}=4000+\frac{D}{У\cdot Т}=4000+\frac{16000}{20\cdot10}=4080\ га;$$

затраты по освоению и орошению этой площади —

$З_{зам}=F_з(к_з+c_з T)=4080\ (800+320\cdot10)=16{,}3$ млн руб;

Общие затраты —

$$\Sigma З=20{,}9+0{,}18+16{,}3=37{,}38 \text{ млн руб.}$$

Подсчитаем эти затраты при другой обеспеченности.

Так, при $p=80\%$

$З_{пр}=7400\cdot(1000+250\cdot10)-0{,}5\cdot0{,}2\cdot10\cdot250\cdot1400=25{,}55$ млн руб.;

$З_{хр}=0{,}45\cdot1400\cdot20\cdot0{,}2\cdot10\cdot2{,}5\cdot10=0{,}65$ млн руб;

$$З_{зам}=\left(2600+\frac{1400\cdot20\cdot0{,}2\cdot10}{20\cdot10}\right)(800+320\cdot10)=11{,}5 \text{ млн руб.}$$

$\Sigma З=25{,}55+0{,}65+11{,}5=37{,}7$ млн руб.

При $p=100\%$ $\Sigma З=38{,}0$ млн руб.

Как видно из приведенных расчетов, любое отклонение от расчетной обеспеченности $p=90\%$ приводит к непроизводительным затратам средств. При существующем ныне нормативе водообеспеченности $p=50\%$ общие затраты в нашем примере будут равны 41 млн руб., или приблизительно на 10% выше оптимальных. Увеличение расчетного срока эксплуатации T приведет к еще большим непроизводительным затратам.

§ 5. Выбор оптимальной оросительной способности реки при сезонном регулировании ее стока

Оптимальная оросительная способность рек в общем случае определяется многими факторами: экономическими (величиной необходимых капитальных вложений, ежегодными издержками эксплуатации оросительной системы, стоимостью заменяющего орошения), гидрологическими (средним многолетним объемом стока, вариацией годовых его объемов, внутригодовой неравномерностью), техническими, связанными с решением проблемы водозабора и регулирования стока, и факторами режима потребления воды (принятой обеспеченностью орошения, величиной потребных оросительных норм и их внутривегетационным распределением).

В зависимости от степени регулирования стока реки влияние этих факторов на ее оптимальную оросительную способность будет различным. Наиболее просто оптимальную оро-

сительную способность реки можно рассчитать при отсутствии возможностей для регулирования стока. В этом случае она определится только водностью реки и потреблением в критический период*, соответствующим принятой на основании технико-экономических расчетов (см. § 2 и 3) обеспеченности орошения:

$$F = \frac{Q_{кр}}{q}, \qquad (15)$$

где F — оросительная способность реки, *га;*

$Q_{кр}$ — расход реки в критический период расчетного года (обеспеченности $p_{расч}$), $м^3/сек$;

q — ордината укомплектованного графика гидромодуля в этот период, $м^3/га$ в *сек.*

Выбор оптимальной экономически обоснованной оросительной способности реки в случае наличия возможностей для регулирования ее стока будет несколько сложнее.

При сезонном регулировании стока реки небольшая емкость водохранилища позволяет компенсировать недостачу воды только в течение небольшого дефицитного периода. Однако эта емкость используется весьма эффективно, так как, наряду с использованием имеющихся избытков бытового стока реки в недефицитной части вегетационного периода, она позволяет обеспечить значительный прирост площади орошения. Увеличение емкости водохранилища, например, вдвое при примерно пропорциональном увеличении затрат на ее создание обеспечит уже меньший прирост площади орошения, так как в этом случае в связи с меньшим количеством оставшейся в вегетационном периоде неиспользуемой части стока реки на каждый дополнительный гектар орошения потребуется большая добавка воды из водохранилища. Иными словами, и техническая, и экономическая эффективность использования единицы полезного объема водохранилища постепенно уменьшается по мере роста его объема. Учитывая, что каждой емкости водохранилища будет соответствовать своя зависимость оросительной способности реки от водности (обеспеченности) года, в вопросе выбора оптимальной оросительной способности, помимо задачи вы-

---

* Критическим периодом в орошении обычно является часть вегетационного периода, в течение которой потребности в орошении (при заданном составе сельскохозяйственных культур, их графике гидромодуля и т. д.) удовлетворяются с наибольшим напряжением.

бора расчетной обеспеченности орошения, возникает дополнительная задача определения оптимальной емкости водохранилища.

Анализируя исходные уравнения для выбора расчетной обеспеченности орошения (13, 14), нетрудно убедиться, что обеспеченность останется примерно постоянной при любом (не равном нулю) значении емкости регулирующего водохранилища. Действительно, все основные входящие в уравнения для определения расчетной обеспеченности орошения члены (удельные урожайности сельскохозяйственных культур, потери эксплуатационных расходов и доля гибели урожая при посушке гектара, расчетный срок окупаемости капитальных вложений, затраты на освоение и эксплуатацию дополнительного гектара и др.) при любой постоянной емкости регулирующего водохранилища с некоторым приближением можно считать одинаковыми.

При регулировании стока определение оптимальной расчетной обеспеченности еще не дает однозначной величины площади орошения и емкости водохранилища, а позволяет лишь выбрать расчетную величину стока в критический период (год). Принимая для этого периода (года) типовое распределение расходов воды в реке, можно подсчитать возможную ее оросительную способность при нескольких наиболее вероятных значениях емкости регулирующего водохранилища. Так, например*, если сток реки, из которой проектируется орошение, составляет в году расчетной обеспеченности 224,5 млн $м^3$, а типовое распределение этого стока по месяцам характеризуется табл. 3 (графа 3), то оросительная способность реки F в зависимости от величины полезной емкости регулирующего водохранилища W будет такой, как изображено на рис. 10. Расчеты сведены в табл. 3.

Как видно из рисунка, графическая зависимость оросительной способности реки от величины полезной емкости регулирующего водохранилища, построенная для года расчетной обеспеченности, имеет форму выпуклой кривой. Это говорит о том, что доля емкости водохранилища, приходящаяся на дополнительный гектар орошения, а следовательно, и затраты на освоение каждого дополнительного гектара орошения растут по мере увеличения использования стока реки.

Величина потребной емкости водохранилища на дополнительный гектар орошения ($\omega_{га}$) в зависимости от площа-

---

* В примере использованы данные из проекта регулирования стока р. Аламедин в целях орошения земель Чуйской долины. Киргизгипроводхоз, 1959.

Расчеты потребной емкости

Период	Месяцы	Сток, млн м³	Потребность структурного гектара, м³ (брутто)	Орошение 20 тыс га			Орошение 25 тыс га		
				Общая потребность, млн м³	потребная полезная емкость водохранилища, млн м³	заполнение водохранилища, млн м³	общая потребность, млн м³	потребная полезная емкость водохранилища, млн м³	Заполнение водохранилища, млн м³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Вегетационный	Май	11,9	630	12,6	0,7	—	15,7	3,8	—
	Июнь	23,4	1420	28,4	5,0	—	35,5	12,1	—
	Июль	45,6	1620	32,4	—	6,1	40,5	—	5,1
	Август	54,8	1550	31,0	—	6,1	38,8	—	17,0
	Сентябрь	28,8	780	15,6	—	6,1	19,5	—	17,0
Невегетационный	Октябрь	15,5	—	—	—	6,1	—	—	17,0
	Ноябрь	9,7	—	—	—	6,1	—	—	17,0
	Декабрь	8,8	—	—	—	6,1	—	—	17,0
	Январь	7,4	—	—	—	6,1	—	—	17,0
	Февраль	5,9	—	—	—	6,1	—	—	17,0
	Март	6,3	—	—	—	6,1	—	—	17,0
	Апрель	6,4	—	—	—	6,1	—	—	17,0
	Итого	224,5	6000	120,0	5,7	6,1	150,0	15,9	17,0
	Всего с учетом потерь на фильтрацию и испарение				6,1			17,0	

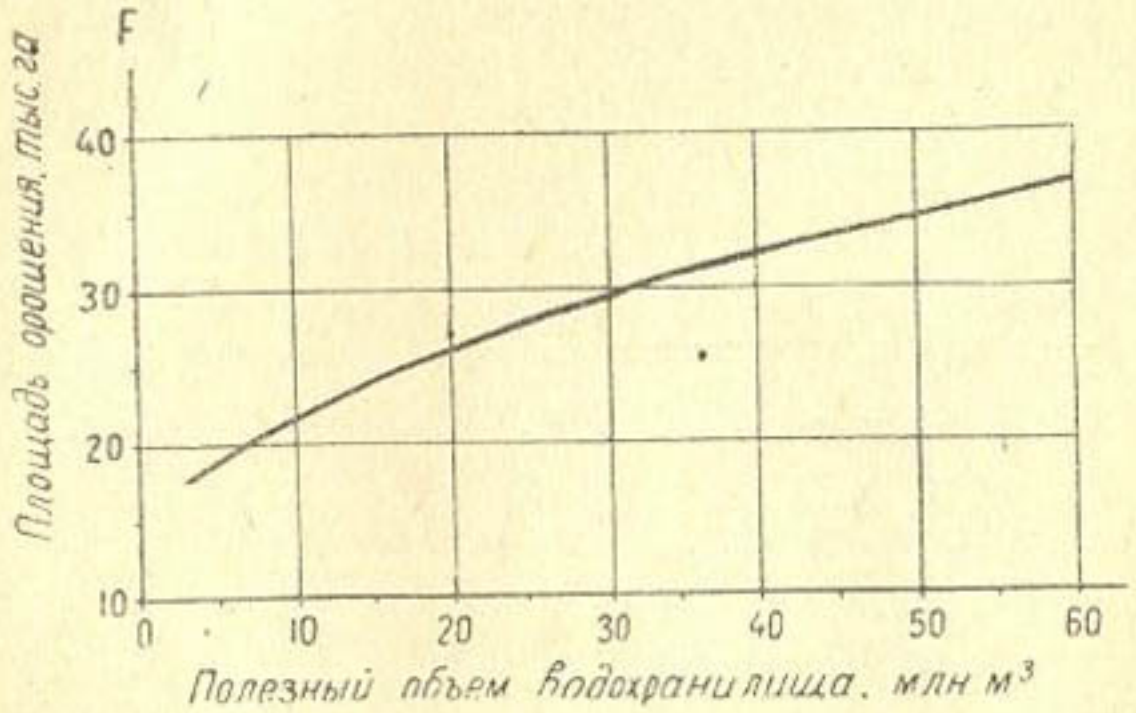


Рис. 10. Зависимость оросительной способности реки в году расчетной обеспеченности от величины полезной емкости регулирующего водохранилища.

Таблица 3

регулирующего водохранилища

Орошение 30 тыс. *га*			Орошение 35 тыс. *га*			Орошение 36,8 тыс. *га*		
общая потребность, *млн м³*	потребная полезная емкость водохранилища, *млн м³*	заполнение водохранилища, *млн м³*	общая потребность, *млн м³*	потребная полезная емкость водохранилища, *млн м³*	заполнение водохранилища, *млн м³*	общая потребность, *млн м³*	потребная полезная емкость водохранилища, *млн м³*	заполнение водохранилища, *млн м³*
11	12	13	14	15	16	17	18	19
18,9	7,0	—	22,0	10,1	—	23,2	11,3	—
42,6	19,2	—	49,7	26,3	—	52,2	28,8	—
48,6	3,0	—	56,7	11,1	—	59,5	13,9	—
46,5	—	3,3	54,3	—	0,5	57,0	2,2	—
23,4	—	13,7	27,3	—	2,0	28,7	—	0,1
—	—	29,2	—	—	17,5	—	—	15,6
—	—	31,2	—	—	23,2	—	—	25,3
—	—	31,2	—	—	36,0	—	—	34,1
—	—	31,2	—	—	43,4	—	—	41,5
—	—	31,2	—	—	49,3	—	—	47,4
—	—	31,2	—	—	51,0	—	—	54,7
—	—	31,2	—	—	51,0	—	—	60,1
180,0	29,2 31,2	31,2	210,0	47, 5 **51,0**	51,0	220,6	56,2 60,1	60,1

ди для нашего примера представлена на рис. 11. Она определялась как $\omega_{га} = \frac{\Delta W}{\Delta F}$. Величины затрат на каждый дополнительный гектар прироста площади орошения могут быть найдены с помощью анализа сметных показателей проектируемого объекта. Так, если для рассматриваемого нами примера сметными расчетами были установлены экономические показатели орошения, приведенные в табл. 4, то затраты на дополнительный гектар орошения определятся (см. табл. 5) в виде относительных приростов

$$к = \frac{\Delta K}{\Delta F}, \qquad с = \frac{\Delta C}{\Delta F},$$

где $к$ — капитальные вложения на дополнительный гектар орошения, соответствующий среднему значению ΔF;

c — ежегодные эксплуатационные издержки (себестоимость полученной продукции) того же гектара.

На рис. 12 приведены величины экономических показателей дополнительного гектара орошения при увеличении по-

Таблица 4

Сводная ведомость затрат по проектируемому объекту

Затраты	Площадь орошения, тыс *га*					В среднем на 1 *га* *руб/га*
	20	25	30	35	36,8	
1	2	3	4	5	6	7
I. Капитальные вложения *K*, млн. *руб.*						
а) На мелиоративное освоение площади (без вложений в строительство водохранилища)	8,6	10,8	13,0	15,0	15,9	430
б) На строительство водохранилища	0,76	2,18	4,0	6,6	7,8	39—210
в) На сельскохозяйственное освоение площади	17,5	21,8	26,2	30,6	32,2	875
Итого	26,88	34,78	43,2	52,2	55,9	1344—1515
II. Ежегодные эксплуатационные издержки *C*, млн. *руб/год*						
а) По водохранилищу	0,03	0,06	0,12	0,22	0,27	1,5—7,5
б) Мелиоративные	0,85	1,06	1,27	1,48	1,57	42,5
в) Сельскохозяйственные	6,20	7,75	9,30	10,86	11,42	310
Итого	7,08	8,87	10,69	12,56	13,26	354—360
III. Среднегодовые расчетные затраты $(C+0,1K)$, млн. *руб /га* в год						
Общие	9,77	12,35	15,01	17,78	18,85	488,4—511,5

лезной емкости регулирующего водохранилища в зависимости от площади. Как видно из рисунка, чем больше осваиваемая площадь сельскохозяйственных угодий, тем хуже становятся экономические показатели дополнительного гектара, ниже экономическая эффективность капитальных вложений, сделанных на его освоение. Нетрудно теперь убедиться и в том, что очень часто применяемый в настоящее время метод оценки экономической эффективности капитальных вложений

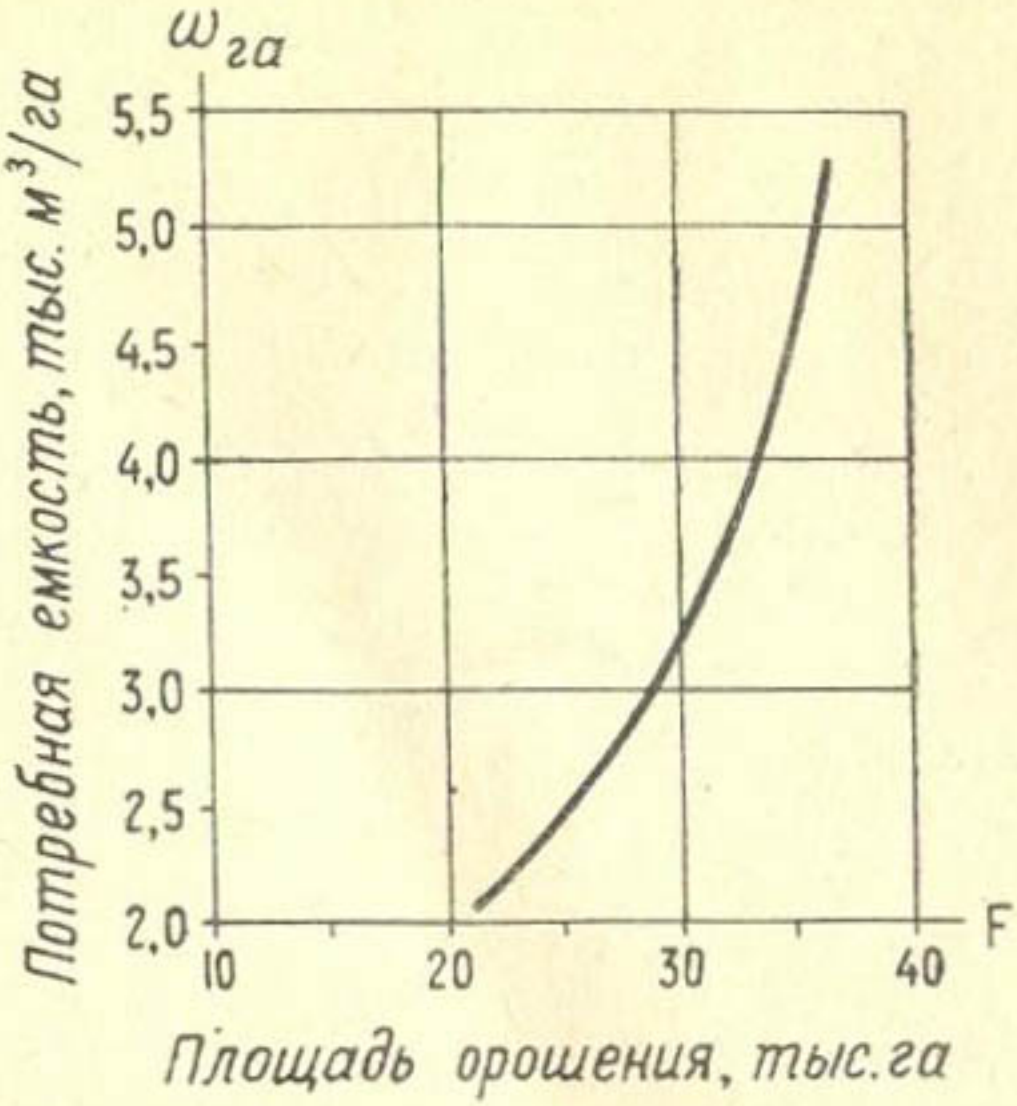


Рис. 11. Потребные емкости водохранилища на дополнительный гектар орошения в зависимости от площади.

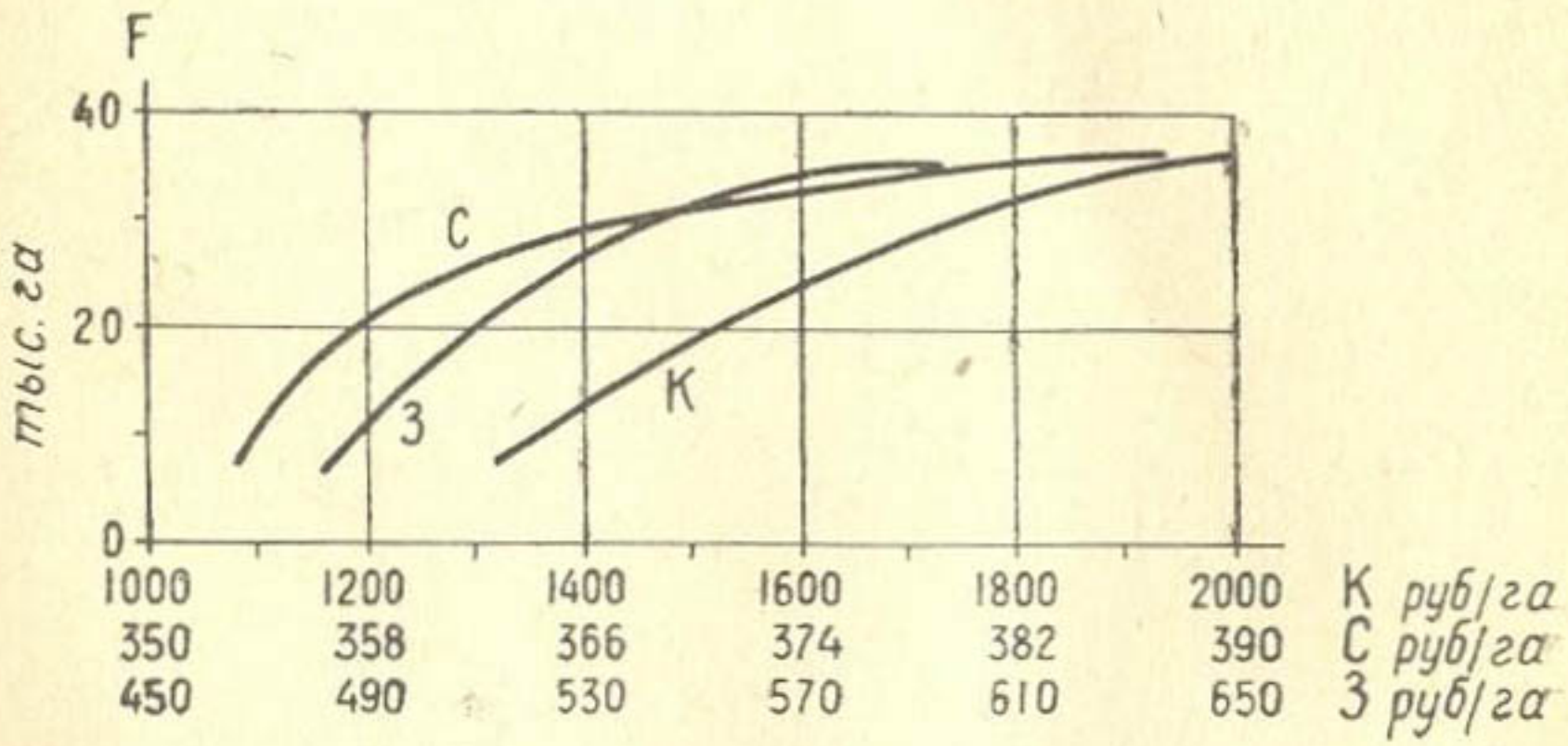


Рис. 12. Величины удельных капитальных вложений *к*, ежегодных эксплуатационных издержек *с* и среднегодовых расчетных затрат *з* на дополнительный гектар в зависимости от площади орошения *F* при увеличении емкости регулирующего водохранилища.

Таблица 5

Подсчет затрат на дополнительный гектар орошения

Площадь орошения, тыс. *га*	Суммарные капитальные вложения, млн руб.	Суммарные ежегодные эксплуатационные издержки, млн *руб/год*	Капиталовложения на дополнительный гектар, *руб/га*	Ежегодные эксплуатационные издержки на дополнительный гектар, *руб/га* в год	Среднегодовые расчетные затраты на дополнительный гектар, *руб/га* в год
0	—	—			
			1345	354	488
20	26,88	7,08			
			1580	3 58	516
25	34,78	8,87			
			1680	364	532
30	43,20	10,69			
			1800	374	554
35	52,20	12,56			
			2060	388	594
36,8	55,90	13,26			

в сельское хозяйство при определении его параметров по абсолютной (суммарной) стоимости мероприятия или по средним удельным показателям может приводить к серьезным ошибкам. Так, если экономическая эффективность использования реки для орошения без регулирования или с незначительным регулированием стока будет высокой, а регулирующее водохранилище дорогим, то эффективность суммарных капитальных вложений (и средних на 1 *га*) может остаться удовлетворительной, в то время как часть или весь прирост площади орошения за счет регулирования стока будет не эффективным.

Для того, чтобы избежать подобных ошибок, следует оценивать экономическую эффективность дополнительного гектара и остановиться на таких площади орошения и емкости регулирующего водохранилища, при которых экономические показатели дополнительного гектара орошения равны предельным для данного направления хозяйств. Площадь орошения и емкость регулирующего водохранилища, при которых капитальные вложения в дополнительный гектар становятся экономически неэффективными, являются оптимальными, а эффективность суммарных капитальных вложений будет соответствовать максимальному своему значению.

Проследим это на нашем числовом примере. Предположим, что лучшим заменяющим вариантом орошения всей или части площади на проектируемом массиве является орошение

его подземными водами с электромашинным подъемом воды. Удельные капитальные вложения в сооружение скважин, их оборудование, необходимую мощность электростанций, линии электропередачи, оросительную сеть и другие затраты, необходимые для полного мелиоративного освоения при тех же сроках, составляют 800 *руб/га**. Вложения в сельскохозяйственное освоение останутся теми же, что и при орошении из реки—875 *руб/га*. Общие капитальные вложения при орошении подземными водами будут равны 1675 *руб/га*.

Ежегодные эксплуатационные издержки составляют: мелиоративные — 55, сельскохозяйственные (те же, что и в проектном варианте) — 310, общие — 365 *руб/га* в год.

Удельные среднегодовые расчетные затраты орошения подземными водами при этом равны

$$з_п=(с_п+Ек_п)=365+0{,}1\cdot1675=532{,}5 \text{ руб/га в год.}$$

Если теперь сравнить экономические показатели орошения подземными водами со средними удельными экономическими показателями орошения из проектируемого источника (см. табл. 4, графа 7), то можно увидеть, что они при всех значениях площади (0÷36,8 тыс. *га*) больше последних. То же будет и при сравнении соответствующих абсолютных экономических показателей.

Следовательно, из анализа средних удельных и абсолютных экономических показателей сравниваемых вариантов орошения напрашивается вывод об экономической нецелесообразности орошения подземными водами. Этот же вывод можно сделать и из сравнения средних удельных и абсолютных показателей рентабельности рассмотренных вариантов. (При одинаковой величине площади орошения и той же продукции показатель рентабельности будет выше у варианта с меньшими капитальными вложениями и издержками производства.)

Однако, если сравнить удельные среднегодовые затраты орошения подземными водами, равные в данном случае 532,5 *руб/га* в год, со среднегодовыми расчетными затратами на дополнительный гектар орошения из реки (см. рис. 12), то можно увидеть, что орошение из реки более 27 тыс. *га* является явно неэффективным, так как каждый дополнительный (сверх 27 тыс.) гектар орошения из реки и соответствующее увеличение емкости регулирующего водохранилища (сверх 23 млн $м^3$, см. рис. 10) требуют больших затрат, чем орошение подземными водами.

---

* См. Проекты орошения подземными водами Карабалтинского и Панфиловского участков Чуйской долины, «Киргизгипроводхоз», 1962.

При использовании в качестве критерия для оценки экономической эффективности капитальных вложений в мелиорацию ее коэффициента рентабельности к решению поставленной задачи выбора оптимальной площади орошения и емкости регулирующего водохранилища можно подойти из соображений равенства коэффициентов рентабельности капитальных вложений в мелиорацию дополнительного гектара орошения ($Эр^{га}$) и допустимого (нормативного) в этих целях ($Э_{доп}$).

$$Э_{р}^{га} = \frac{pd}{к_{м}} = Э_{доп}.\ Э_{доп} = \frac{1}{О_{доп}},$$

где p — расчетная обеспеченность орошения;

d — чистый доход среднего (структурного) гектара орошения в водообеспеченном году, относимый на мелиорацию (равный разности чистого дохода структурного гектара с мелиорацией и без нее);

$к_{м}$ — удельные капитальные вложения на мелиорацию дополнительного гектара;

$Одоп$ — допустимый срок абсолютной окупаемости капитальных вложений в мелиорацию.

Отсюда предельные капитальные вложения на мелиорацию дополнительного гектара должны быть не более

$$к_{м.доп} = \frac{pd}{Э_{доп}} \quad . \tag{16}$$

Сравнивая величину $к_{м.доп}$ с величинами реальных капитальных вложений на мелиорацию дополнительного гектара орошения, зависимость которых от площади орошения будет подобна зависимости рис. 12, где показаны суммарные капитальные вложения на дополнительный гектар орошения с учетом сельскохозяйственного освоения, найдем оптимальную площадь. Оптимальная емкость регулирующего водохранилища определится из зависимости рис. 10.

§ 6. Оптимальная оросительная способность реки при сезонном компенсирующем регулировании ее стока*

К компенсирующему регулированию стока приходится прибегать во всех случаях, когда водохранилища располагаются на некотором удалении от потребителей воды и ими регулируется не весь сток. При регулировании стока рек в целях орошения компенсирующее регулирование является одним из наиболее распространенных видов. Это объясняется тем, что,

---

* Под компенсирующим в данном случае понимается такой режим регулирования стока, который приспособлен к неравномерности расходов воды в реке не только в створе водохранилища, но и с нижележащего бассейна в целях более полного его использования для орошения.

с одной стороны, водохранилища являются весьма редкими и дорогими сооружениями, с другой — поля орошения располагаются вдоль рек на значительных расстояниях, в пределах которых часто имеет место нерегулируемая приточность. В этих условиях водохранилища должны так зарегулировать поступающий к ним сток, чтобы попуски из них вместе с притоком с частного водосбора обеспечили бы максимальное использование стока на орошение и удовлетворили бы его требованиям к режиму.

Сезонное компенсирующее регулирование стока отличается от обычного сезонного лишь тем, что позволяет более полно использовать сток с частного водосбора. Следовательно, и отличие его в расчетах будет в дополнительном учете возможных избытков стока с частного водосбора, которые могли бы быть использованы на орошение при условии необходимых добавок воды в критический период из водохранилища. При этом ясно, что такие избытки могут быть только в течение вегетационного периода года, так как сток с частного водосбора невегетационного периода не может быть задержан вышерасположенным водохранилищем и использован на орошение без регулирования его собственными водохранилищами. Не может быть отнесен к избыткам и сток вегетационного периода, используемый на орошение без регулирования. Поэтому к искомым нами избыткам может быть отнесена только часть стока вегетационного периода года расчетной обеспеченности (p), превышающая водопотребление орошения, подсчитанного по критическому периоду

$$\Delta V_i = V_i - V_{кр\,i}\,. \qquad (17)$$

где ΔV_i — избытки стока с частного водосбора в i-том месяце вегетационного периода года расчетной обеспеченности, которые могут быть использованы на орошение при условии необходимых добавок воды из водохранилища в критический период, *м³/мес*;

V_i — суммарная боковая приточность реки в зоне проектируемого орошения ниже водохранилища в том же месяце расчетного года *м³/мес*.

$V_{кр\,i}$ — возможное водопотребление боковой приточности в том же месяце, рассчитанное по критическому периоду (сответствующее случаю без регулирования приточности, см. § 5), *м³/мес*.

Если подсчитать эти избытки для всех месяцев вегетаци-

онного периода расчетного года и внести их в дополнительную графу (3а) табл. 3, то все последующие расчеты по определению оптимальной оросительной способности реки и емкости регулирующего водохранилища останутся теми, же, что и для случая обычного сезонного регулирования. Потребная полезная емкость водохранилища для каждой принятой площади орошения (графы 6, 9, 12, 15, 18) будет при этом меньшей за счет использования избытков боковой приточности. Заполнение водохранилища (графы 7, 10, 13, 16, 19) подсчитывается только исходя из стока, поступающего в него из вышележащего бассейна (графа 3). Вследствие уменьшения потребной полезной емкости водохранилища при том же приросте площади орошения экономическая эффективность компенсирующего регулирования оказывается выше, чем эффективность обычного сезонного регулирования. Значительно большей оказывается и оптимальная экономически обоснованная емкость водохранилища при всех тех же технических и экономических показателях орошения.

§ 7. Экономическая эффективность многолетнего регулирования стока

Многолетнее регулирование стока рек в целях орошения при заданной его обеспеченности p имеет своей задачей получение прироста орошаемой площади сельскохозяйственных угодий. Следовательно, его экономическая эффективность будет определяться эффективностью этого прироста.

При конкретном проектировании объекта для многолетнего регулирования стока реки обычно являются заданными: средний многолетний сток $\bar{V}$, вариация годовых его объемов C_v и расчетная обеспеченность орошения p. Этих данных вполне достаточно, чтобы, пользуясь известными в литературе графиками для расчетов многолетнего регулирования стока рек (Плешков [29], Иванов [16], Саваренский [33], Гуглий [12], Маматканов [22] и др.), определить гарантированную годовую отдачу воды α при любом принятом значении многолетней составляющей емкости водохранилища $\beta_{мн}$.

Так как многолетнее регулирование стока по сравнению с сезонным требует значительно большей полезной емкости водохранилища на каждый дополнительный гектар прироста орошения, оно является экономически менее эффективным и должно развиваться только после полного сезонного зарегулирования стока в году расчетной обеспеченности p. В этом случае расчетная площадь орошения при годовой зарегули-

рованной отдаче воды α, оросительной норме среднего структурного гектара* проектируемого массива орошения M и среднем многолетнем стоке реки $\bar{V}$ будет равна

$$F=\frac{\alpha\bar{V}-\beta\bar{V}r}{M}, \qquad (18)$$

где r — годовые потери стока на фильтрацию и испарение из водохранилища, выраженные в долях от его емкости $r=\frac{W_n}{W}$;

W_n — объем годовых потерь, $м^3$;

$W=\beta\bar{V}$ — общая емкость водохранилища, $м^3$;

β — коэффициент общей (сезонной плюс многолетней) емкости водохранилища.

Потребная полезная емкость водохранилища на дополнительный гектар прироста орошения равна $\omega_{га}=\frac{dW}{dF}$ или, выраженная в конечных приращениях,

$$\omega_{га}=\frac{\Delta W}{\Delta F}=\frac{\Delta\left(\frac{W}{\bar{V}}\right)}{\Delta\left(\frac{F}{\bar{V}}\right)}=\frac{\Delta\beta}{\Delta\left(\frac{F}{\bar{V}}\right)}.$$

Определяя $\left(\frac{F}{\bar{V}}\right)$ из (18), получим

$$\omega_{га}=\frac{\Delta\beta}{\Delta\left(\frac{\alpha-\beta r}{M}\right)}. \qquad (19)$$

Потребная полезная емкость водохранилища на 1 $м^3$ расчетной оросительной нормы дополнительного гектара орошения с учетом потерь стока на фильтрацию и испарение из водохранилища составляет

$$\omega=\frac{\omega_{га}}{M}=\frac{\Delta\beta}{\Delta\alpha-\Delta\beta r}. \qquad (20)$$

---

* Средним (структурным) гектаром называют условный гектар с полным принятым для проектируемого массива севооборотом и учетом удельного веса всех сельскохозяйственных культур и многолетних насаждений в общей площади массива нетто.

Без учета потерь (при $r=0$)

$$\omega^{\circ}=\frac{\Lambda\beta}{\Delta\alpha}, \tag{21}$$

а соотношения между ω и ω° будут иметь вид:

$$\omega=\frac{1}{\frac{1}{\omega^{\circ}}-r} \quad ; \quad \omega^{\circ}=\frac{1}{\frac{1}{\omega}+r} \tag{22}$$

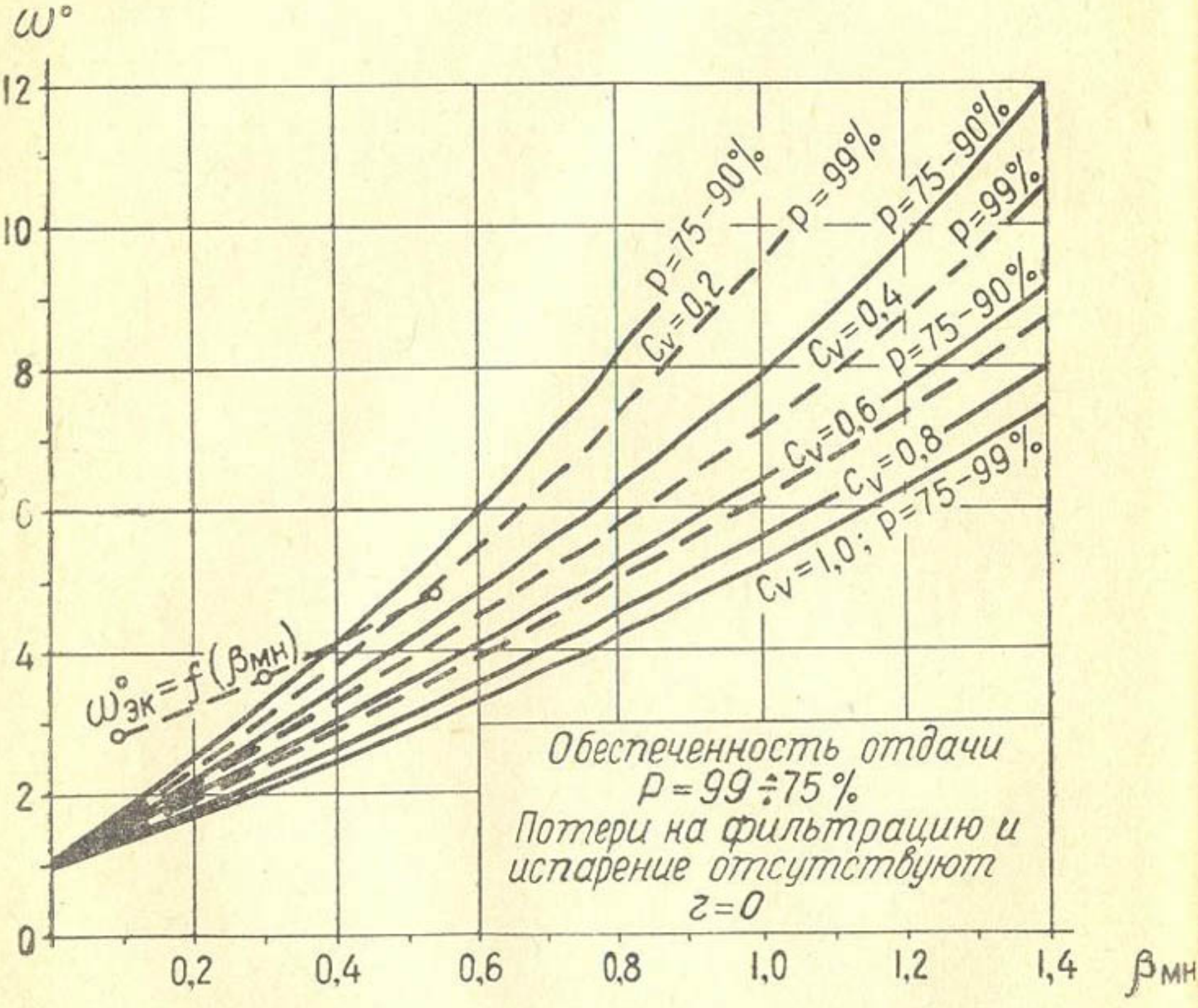


Рис. 13. Графики для определения потребной полезной емкости водохранилища многолетнего регулирования стока рек на 1 $м^3$ увеличения годовой гарантированной отдачи воды.

На рис. 13. построены графики $\omega^0 = f(\beta_{мн})$ для обеспеченности орошения 75—99% при различных C_v. Для их построения были использованы графики расчетов многолетнего регулирования стока рек, предложенные И. В. Гуглием [12] и разработанные им методом С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля [20]. Графики И. В. Гуглия являются одними из последних по времени их разработки и отличаются дополнительным учетом корреляционной связи между величинами стока смежных лет.

Методика построения графиков рис. 13 сводилась к следующему. Для принятых значений обеспеченности орошения p=75, 90 и 99% по графикам И. В. Гуглия (практически те же результаты дают и графики Д. Маматканова [22], разработанные в 1962 г. и учитывающие, кроме связей стока смежных лет, возможную цикличность в чередовании группировок маловодных лет) определялась отдача α при различных значениях многолетней емкости водохранилища $\beta_{мн}$ и вариации годовых расходов воды в реке C_v. В табл. 6 в качестве примера приведены эти данные для p=75% и C_v=0,6. Для каждых принятых значений p, $\beta_{мн}$ и C_v по уравнению (21) определялись величины ω^0 потребной полезной емкости водохранилища на 1 $м^3$ оросительной нормы дополнительного гектара орошения без учета возможных потерь стока на фильтрацию и испарение из водохранилища и наносились на поле графика $\omega^0 = f(\beta_{мн \cdot ср})$.

Анализ полученных графиков показал, что величины ω^0 при одних и тех же значениях коэффициента вариации стока C_v и емкости водохранилища $\beta_{мн \cdot ср}$ в пределах изменения обеспеченности 75 — 90% очень мало зависят от нее, а точность исходных графиков для расчета многолетнего регулирования стока недостаточна для выявления этой зависимости. На рис. 13 для обеспеченности 75—90% сплошными линиями показаны осредненные значения зависимостей $\omega^0 = f(\beta_{мн \cdot ср})$.

Таблица 6

Подсчет потребной емкости водохранилища на 1 $м^3$ оросительной нормы дополнительного гектара

$\beta_{мн}$	α	$\Delta\beta_{мн}$	$\Delta\alpha$	$\beta_{мн \cdot ср}$	$\omega^0 = \frac{\Delta\beta}{\Delta\alpha}$
0	0,555				
		0,2	0,130	0,1	1,54
0,2	0,685				
		0,2	0,080	0,3	2,50
0,4	0,765				
		0,2	0,055	0,5	3,64
0,6	0,820				
		0,2	0,045	0,7	4,45
0,8	0,865				
		0,2	0,035	0,9	5,72
1,0	0,900				

При рассмотрении обеспеченности орошения $p=99\%$ заметна тенденция к некоторому уменьшению величин ω^0 (увеличению эффективности многолетнего регулирования стока), особенно при больших емкостях водохранилища $\beta_{мн}>0{,}7$ (см. пунктирные построения на рис. 13). Из этого можно сделать вывод, что при понижении обеспеченности орошения ниже 75% потребные емкости водохранилища при тех же $\beta_{мн}$ и C_v будут больше указанных на графике.

Полученные графики $\omega^0=f(\beta_{мн})$ могут быть использованы для приближенных расчетов многолетнего регулирования стока. Однако для этого необходим дополнительный экономический анализ эффективности прироста орошения. Экономическая эффективность орошения дополнительного гектара за счет многолетнего регулирования стока может быть выявлена путем сравнения необходимых при этом среднегодовых расчетных затрат со среднегодовыми расчетными затратами лучшего заменяющего варианта орошения (или сопоставлением коэффициента рентабельности проектируемого прироста орошения с нормативным).

Увеличение площади сельскохозяйственных угодий на проектируемом массиве орошения из водохранилища можно считать эффективным до тех пор, пока среднегодовые расчетные затраты на дополнительный гектар с учетом затрат по водохранилищу, равные

$$Eк_{га}+c_{га}+\omega_{га}kE+\omega_{га}kn=з_{га}+\omega_{га}k(E+n),$$

не сравняются со среднегодовыми расчетными затратами по заменяющему варианту орошения, приведенными в сопоставимые условия с проектируемым вариантом:

$$з_{га}+\omega_{га}k(E+n)=\lambda з_{зам}, \qquad (23)$$

где $з_{га}$ — среднегодовые расчетные затраты на дополнительный гектар орошения на проектируемом массиве без затрат по водохранилищу, *руб/га* в год;

$\omega_{га}$ — потребная полезная емкость водохранилища на дополнительный гектар прироста орошения $м^3/га$;

k — удельные капитальные вложения на 1 $м^3$ дополнительной полезной емкости водохранилища, $руб/м^3$;

E — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений в сельском хозяйстве;

n — ежегодные эксплуатационные издержки по водохранилищу, выраженные в долях от единовременных капитальных вложений в него (обычно 0,01—0,04);

$\kappa_{га}$; $с_{га}$ — единовременные капитальные вложения и ежегодные издержки производства дополнительного гектара орошения (без затрат по водохранилищу);

λ — соотношение урожайности на проектируемом и заменяющем массивах орошения;

$з_{зам}$ — удельные среднегодовые расчетные затраты по заменяющему варианту орошения, *руб/га* в год.

Из уравнения (23) экономически оправдываемая величина емкости водохранилища на дополнительный гектар орошения

$$\omega_{га\ эк}=\frac{\lambda з_{зам}-з_{га}}{k(E+n)} . \qquad (24)$$

а на 1 $м^3$ оросительной нормы дополнительного гектара

$$\omega_{эк}=\frac{\omega_{га\ эк}}{M}=\frac{\lambda з_{зам}-з_{га}}{k(E+n)M} . \qquad (25)$$

Оптимальная емкость регулирующего водохранилища будет соответствовать условию

$$\omega=\omega_{эк} \text{ или по (22) } \frac{1}{\frac{1}{\omega^{\circ}}-r}=\frac{\lambda з_{зам}-з_{га}}{k(E+n)M},$$

откуда

$$\omega^{\circ}_{эк}=\frac{\lambda з_{зам}-з_{га}}{\kappa(E+n)M+r(\lambda з_{зам}-з_{га})} . \qquad (26)$$

При использовании в качестве критерия для определения экономической эффективности капитальных вложений в орошение его коэффициента рентабельности допустимая емкость водохранилища на 1 $м^3$ оросительной нормы дополнительного гектара составит

$$\omega^{\circ}_{доп}=\frac{pd-Э_{д}\kappa_{га}}{Э_{д}kM+r(pd-Э_{д}\kappa_{га})} , \qquad (26а)$$

где p — расчетная обеспеченность орошения;

d — чистый доход от реализации продукции с 1 среднего (структурного) гектара в водообеспеченном году, относимый на мелиорацию (равный разности чистого дохода при мелиорации и без нее);

$Э_{д}$ — допустимый (нормативный) коэффициент рентабельности капитальных вложений в мелиорацию, соответствующий данному сельскохозяйственному направлению;

$\kappa_{га}$ — единовременные капитальные вложения на мелиорацию дополнительного гектара орошения (без затрат по водохранилищу);

$к$; M; r — то же, что и в вышеприведенных обозначениях.

Уравнение (26а) выведено (с помощью тех же математических преобразований, что и уравнения 24, 25, 26) из условия равенства коэффициентов рентабельности капитальных вложений в мелиорацию дополнительного гектара ($Э_р$) и нормативного ($Э_д$).

$$Э_р = \frac{pd}{к_{га} + \omega_{га} k} = Э_д .$$

Следовательно, все практические расчеты по определению экономической эффективности многолетнего регулирования стока в целях орошения и выбору оптимальной емкости регулирующего водохранилища сводятся в данном случае к подсчету по формуле (26) величины экономически оправдываемой емкости водохранилища на 1 $м^3$ оросительной нормы дополнительного гектара, приведенной к случаю отсутствия потерь из водохранилища $\omega^{\circ}_{эк}$ и сравнению с потребностной для него емкостью ω°. Потребные емкости водохранилища (без учета потерь стока на фильтрацию и испарение) приведены на расчетном обобщенном графике рис. 13.

Так, например, если среднегодовые расчетные затраты по заменяющему орошению $з_{зам} = 532{,}5$ *руб/га* в год, по проектируемому объекту (без водохранилища) $з_{га} = 483$ *руб/га* в год, удельные капиталовложения на 1 $м^3$ полезной емкости водохранилища $k = 0{,}128$ *руб/м*^{3}, ежегодные издержки эксплуатации водохранилища равны $\sim 4\%$ от единовременных капитальных вложений, оросительная норма среднего структурного гектара $M = 6000$ *м*^{3}*/га* и годовые потери стока на фильтрацию и испарение из водохранилища составляют примерно 8% его емкости, то*

$$\omega^{\circ}_{эк} = \frac{532{,}5 - 483}{0{,}128(0{,}1 + 0{,}04)6000 + 0{,}08(532{,}5 - 483)} = 0{,}45 < 1.$$

Сравнивая $\omega^{0}_{эк}$ с потребными емкостями водохранилища на 1 $м^3$ оросительной нормы дополнительного гектара (рис. 13), видим, что при этих технико-экономических показателях орошения многолетнее регулирование стока реки является экономически неэффективным независимо от коэффициента вариации ее стока C_v.

Эффективно будет лишь сезонное регулирование стока, так как в этом случае экономически оправдываемая величи-

---

* Все технико-экономические показатели взяты из примера, приведенного в § 5.

на емкости водохранилища на дополнительный гектар орошения (см. формулу 24)

$$\omega_{га\ эк}=\frac{532{,}5-483}{0{,}128(0{,}1+0{,}4)}=2770\ м^3/га,$$

что соответствует при сезонном регулировании стока (см. пример из § 5, рис. 10 и 11) площади орошения $F=27$ тыс. *га* и полезной емкости водохранилища $W=23$ млн $м^3$.

Многолетнее регулирование стока будет экономически эффективным в данном случае при удельных капитальных вложениях на 1 $м^3$ полезной емкости водохранилища $k<0{,}055$ *руб*/$м^3$. Так, при $k=0{,}01$; $n=0{,}02$ (это соответствует наиболее экономичным водохранилищам из запроектированных и построенных в Советском Союзе для многолетнего регулирования стока в целях орошения [9]) экономически оправдываемая емкость на 1 $м^3$ оросительной нормы дополнительного гектара составит

$$\omega^{\circ}_{эк}=\frac{532{,}5-483}{0{,}01(0{,}1+0{,}02)6000+0{,}08(532{,}5-483)}=\frac{49{,}5}{11{,}2}=4{,}4.$$

Соответствующая ей оптимальная составляющая емкости водохранилища для многолетнего регулирования стока будет равна (см. рис. 13) при $C_v=0{,}2$ $\beta_{мн}=0{,}42$, при $C_v=1{,}0$ $\beta_{мн}=0{,}80$.

Коэффициент зарегулированной отдачи α для этих C_v; $\beta_{мн}$ и заданной обеспеченности орошения p найдется из графиков для расчетов многолетнего регулирования стока [12, 16, 22, 29, 33 и др.].

В еще более благоприятных условиях — при комплексном использовании водохранилища и отнесении части затрат по нему на других компонентов комплекса, меньших потерях воды из водохранилища, меньших оросительных нормах и более дорогих заменяющих вариантах орошения — экономическая эффективность многолетнего регулирования стока и оптимальная емкость водохранилища возрастут.

При затратах по водохранилищу k равных нулю уравнения (26) дадут предельное значение удельной емкости на 1 $м^3$ оросительной нормы дополнительного гектара $\omega^{\circ}_{эк}=\frac{1}{r}$, соответствующее (на графиках рис. 13) такой емкости водохранилища ($\beta_{мн}$), при которой наступает физический пре-

дел увеличения полезной зарегулированной отдачи воды — α_n (дальнейшее увеличение емкости водохранилища вследствие увеличения потерь стока на фильтрацию и испарение из него уже приводит к уменьшению отдачи α_n).

В случае ведения водохранилищем компенсирующего многолетнего регулирования стока в целях орошения его оптимальная емкость может быть определена принципиально тем же методом, что и при обычном многолетнем регулировании, с использованием наших графиков (рис. 13) и уравнений (26). Однако для этого необходимо ввести предварительно коррективы в параметры контролируемого этим водохранилищем стока. Метод такой корректировки для расчетов компенсирующего многолетнего регулирования стока был предложен ранее Г. П. Ивановым [3, 16]. Сущность его заключается в том, что при введении соответствующих коррективов в параметры стока реки, вытекающих из условий компенсирующего регулирования верховым водохранилищем, расчеты можно вести обычными путями, разработанными для условий некомпенсирующего регулирования.

Компенсирующее многолетнее регулирование отличается от обычного многолетнего тем, что, несмотря на полное задержание стока в створе проектируемого водохранилища, в отдельные годы вследствие ограниченной емкости нижележащих водохранилищ (или при отсутствии последних) часть стока с частного водосбора обращается в сбросы в то время, когда верховое водохранилище оказывается еще не заполненным.

Это равносильно тому, что регулирующее воздействие водохранилищ распространяется не на весь сток, поступающий к створу водопотребления и, следовательно, для получения стока, участвующего в регулировании, необходимо естественный сток в створе водопотребления уменьшить на величину сбросов или сток в створе проектируемого водохранилища увеличить на величину возможного к использованию стока с частного водосбора.

В дальнейшем для исправленного стока находятся соответствующие параметры — норма и коэффициенты вариации и асимметрии, которыми можно воспользоваться для расчетов регулирования известными методами математической статистики.

Разумеется, что в тех случаях, когда емкость нижележащих водохранилищ оказывается достаточной для практически полного зарегулирования стока с частного водосбора и сбросы при ненаполненном верховом водохранилище отсут-

ствуют, будет иметь место обычного вида многолетнее регулирование. Расчет суммарной емкости водохранилищ при таком регулировании следует производить по полному естественному стоку в створе водопотребления без внесения коррективов [3, 16].

Учитывая более высокую экономическую эффективность сезонного регулирования стока в целях орошения (в том числе и компенсирующего), многолетнее регулирование следует развивать только после полного компенсирующего сезонного зарегулирования стока в году расчетной обеспеченности орошения p. Следовательно, емкостью водохранилища, предназначенной для компенсирующего многолетнего регулирования стока, можно будет контролировать избытки воды в створе водопотребления только в течение невегетационного периода многоводных лет, водность которых больше водности года расчетной обеспеченности p. Возможные избытки воды в годы меньшей водности контролируются сезонной емкостью водохранилища. Сток невегетационного периода, поступающий в реку ниже водохранилища, им вообще не контролируется.

Применительно к рассматриваемому нами случаю компенсирующего многолетнего регулирования стока в целях орошения последовательность расчетов по определению величины контролируемых водохранилищем расходов и выбору оптимальной его емкости практически может быть следующей:

а) определяются возможные избытки воды многоводных лет с частного водосбора, которые могут быть использованы на орошение с заданной его обеспеченностью p при условии необходимых добавок воды из водохранилища в течение маловодных лет. Эти избытки в каждом (i-том) году будут равны

$$\Delta V_i = V'_{вi} - V'_{вр},$$

где $V'_{вi}$ — сток с частного водосбора за вегетационный период i-того года;

$V'_{вр}$ — то же в году расчетной обеспеченности орошения p;

б) полученные величины избытков воды ΔV_i прибавляются к стоку соответствующих им лет реки в створе проектируемого водохранилища $V_{кi} = V_i + \Delta V_i$;

$V_{кi}$ — контролируемый проектируемым водохранилищем сток реки в i-том году;

V_i — действительный годовой сток реки в створе водохранилища в том же году;

в) подсчитываются расчетные параметры контролируемого водохранилищем стока: средняя многолетняя его величина $\bar{V}_к$ и коэффициент варицаии $C_{Vк}$; дальнейшие расчеты по определению оптимальной емкости водохранилища останутся прежними;

г) по уравнению (26) подсчитывается величина экономически оправдываемой емкости водохранилища на 1 $м^3$ оросительной нормы дополнительного гектара ($\omega^0_{эк}$);

д) по полученным значениям $C_{Vк}$ и $\omega^0_{эк}$ на графиках рис. 13 определяется соответствующая им $\beta_{мн\,к}$; оптимальная составляющая емкости водохранилища для компенсирующего многолетнего регулирования стока реки будет $W_{мн,к}=\beta_{мн.к}\bar{V}_к$.

Прирост коэффициента зарегулированной отдачи воды $\Delta\alpha_к$ при компенсирующем многолетнем регулировании стока реки водохранилищем с относительной составляющей емкости $\beta_{мн.к}$ будет равен

$$\Delta\alpha_к = \alpha_{\beta к} - \alpha_{ок},$$

где $\alpha_{\beta к}$ — коэффициент зарегулированной отдачи контролируемого водохранилищем стока реки. Общая отдача воды рекой при этом будет большей, так как часть стока с частного водосбора может быть использована на орошение и без многолетней подрегулировки водохранилищем.

Для заданной обеспеченности орошения p, полученных значений $C_{Vк}$ и $\beta_{мн.\,к}\alpha_{\beta к}$ определится по известным графикам для расчетов многолетнего регулирования стока [12, 16, 22 29, 33 и др.];

$\alpha_{ок}$ — то же бытового стока реки в створе водохранилища при соответствующем ему C_v, той же обеспеченности орошения p и $\beta_{мн}=0$.

Прирост площади орошения в этом случае составит

$$\Delta F=\frac{\Delta\alpha_к\,\bar{V}_к - \beta\bar{V}_к\,r}{M}.$$

ГЛАВА III

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОРОШЕНИЯ И ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ИРРИГАЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕКИ

§ 1. Режим использования проектируемой ГЭС в энергосистеме в условиях расчетной обеспеченности

Основным руководящим принципом при назначении режимов работы проектируемых комплексных ирригационно-энергетических объектов должен быть принцип достижения минимума народнохозяйственных затрат на создание объекта и ежегодное (в течение всего расчетного срока эксплуатации) производство планируемой продукции.

Для соблюдения указанного принципа режим энергетического использования гидроэлектростанции в гидрологических условиях расчетной обеспеченности должен устанавливаться такой, при котором выделенное для нее количество воды позволило бы, с одной стороны, достичь возможно максимального участия ГЭС в балансе мощности энергосистемы, с другой — свести к минимуму непроизводительные потери воды и энергии. Максимальное участие ГЭС в балансе мощности системы должно быть обеспечено с таким расчетом, чтобы свести к минимуму необходимую к вводу в энергосистеме новую мощность тепловых электростанций и тем самым сократить величину новых капиталовложений в энергетике, минимум непроизводительных потерь воды приведет к сокращению выработки энергии тепловых станций и сведет к минимуму эксплуатационные издержки.

Следует отметить, что этому же принципу должен быть подчинен режим работы ГЭС и в случае перебойных лет, т. е. лет еще более маловодных, чем год, соответствующий расчетной обеспеченности. В этих случаях стремление к максимальному участию ГЭС в балансе мощности энергосистемы приведет к сокращению дополнительных издержек по созданию специальных резервов энергетических и производственных мощностей, а экономичное расходование воды уменьшит дефицит энергии.

Задача получения максимальной мощности и одновременно наибольшей выработки энергии ГЭС должна быть поло-

жена в основу всех водноэнергетических расчетов системы на всех стадиях проектирования. Наиболее полное решение этой задачи требуется при разработке планов эксплуатации энергосистемы (построении диспетчерских графиков регулирования) для расчетных и перебойных лет.

Для выполнения поставленных требований необходимо:

1) выбрать наивыгоднейшие очередность и пределы сработки регулирующих водохранилищ энергосистемы, обеспечивающие минимум непроизводительных потерь воды;

2) предоставить возможность гидроэлектростанциям покрывать самую верхнюю пиковую зону суточного графика нагрузки энергосистемы; при этом гидроэлектростанции, потребляя то же количество воды, смогут участвовать в покрытии нагрузок энергосистемы бóльшей мощностью;

3) обеспечить ремонт возможно большего числа агрегатов тепловых станций в период избытка мощности и энергии на ГЭС, а ремонт гидроагрегатов — в период снижения мощности ГЭС по водотоку. Это позволит снизить необходимую мощность ремонтного резерва в энергосистеме;

4) возложить на гидростанции в максимально возможной степени ведение частоты энергосистемы, что позволит значительно повысить участие ГЭС в балансе мощности энергосистемы без предъявления каких-либо дополнительных требований к величине используемого стока;

5) отнести на ГЭС только ту часть необходимой в энергосистеме аварийной резервной мощности, которая может быть обеспечена небольшим количеством резервной энергии, т. е. аварийный резерв следует в основном возложить на тепловые станции, оставляя ГЭС только ту его часть, которая используется редко и кратковременно; эта рекомендация основана на том, что отнесение на ГЭС указанной части резервной мощности также повышает ее участие в балансе мощностей энергосистемы без предъявления значительных дополнительных требований к величине используемого стока.

Следовательно, активная часть баланса мощностей энергосистемы, максимальное участие в которой должны обеспечить гидростанции при гидрологических условиях расчетной обеспеченности, состоит из мощностей, необходимых для непосредственного покрытия нагрузок энергосистемы, для создания возможности останавливать агрегаты всех электростанций системы на капитальные ремонты и для обеспечения энергосистемы соответствующими резервами — ведения частоты, аварийным и т. п.

Назначение того или иного водноэнергетического режима

для гидроэлектростанций системы окажет влияние на величину их участия только в двух первых составляющих указанной активной части баланса мощности энергосистемы. Использование же гидростанций в качестве резерва для ведения частоты и аварийного резерва связано с очень незначительным дополнительным расходованием воды или даже вовсе не связано с ним, вследствие чего эти энергетические функции ГЭС от водноэнергетического режима практически не зависят и поэтому нами не рассматриваются.

§ 2. Построение расчетного графика нагрузки проектируемых ГЭС энергосистемы

Построение графика нагрузки гидроэлектростанций энергосистемы для гидрологических условий расчетной обеспеченности может быть произведено методом, предложенным «Руководящими указаниями по выбору оптимальных режимов совместно работающих гидравлических и тепловых электростанций» [31]. Следует однако дополнительно учесть, что мощности тепловых и гидравлических электростанций, подлежащие остановке в расчетном году на капитальные ремонты, могут быть размещены не только на участке сезонного провала нагрузок (участок *а—б—в—а* на рис. 14), но и на участке временного избытка мощности в энергосистеме после ввода новой станции (агрегатов), покрывающей прирост нагрузки расчетного года (участок *в—г—д—в*).

На рис. 14 приведен перспективный годовой график максимумов нагрузки одной из среднеазиатских энергетических систем; в качестве примера внизу дан график нагрузки гидроэлектростанций для случая суммарной мощности ТЭС системы 1385 тыс. *квт*.

Возможности покрытия графика нагрузки существующими в энергосистеме гидроэлектростанциями в расчетном году обычно вполне определенны и их вычисление не вызовет особых затруднений. Выделяя на общем графике нагрузки гидроэлектростанций часть его, покрываемую существующими ГЭС, найдем график нагрузки проектируемых ГЭС. На рис. 15 он изображен отдельно. Нижняя граница его будет зависеть от энергетических возможностей проектирумых ГЭС; она же (нижняя граница) определит и мощность тепловых электростанций в энергосистеме.

Для определения необходимой выработки энергии гидроэлектростанций (или средней их мощности) в отдельные месяцы расчетного года удобно воспользоваться месячными интегральными кривыми графика нагрузки энергосистемы, пред-

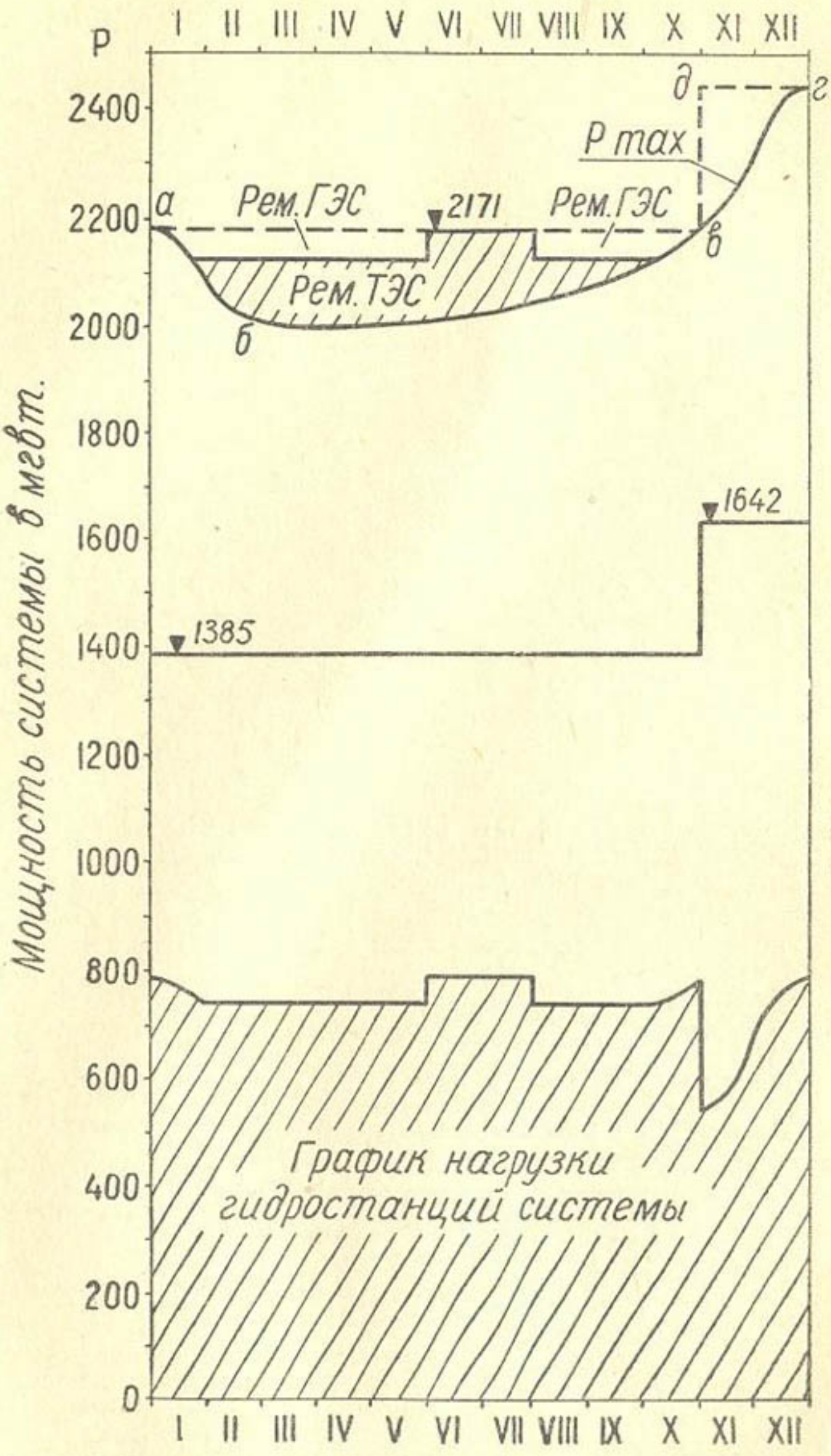


Рис. 14. Расчетный график нагрузки энергосистемы. При его построении принято, что вся тепловая мощность системы 4,5% времени в году находится в ремонте.

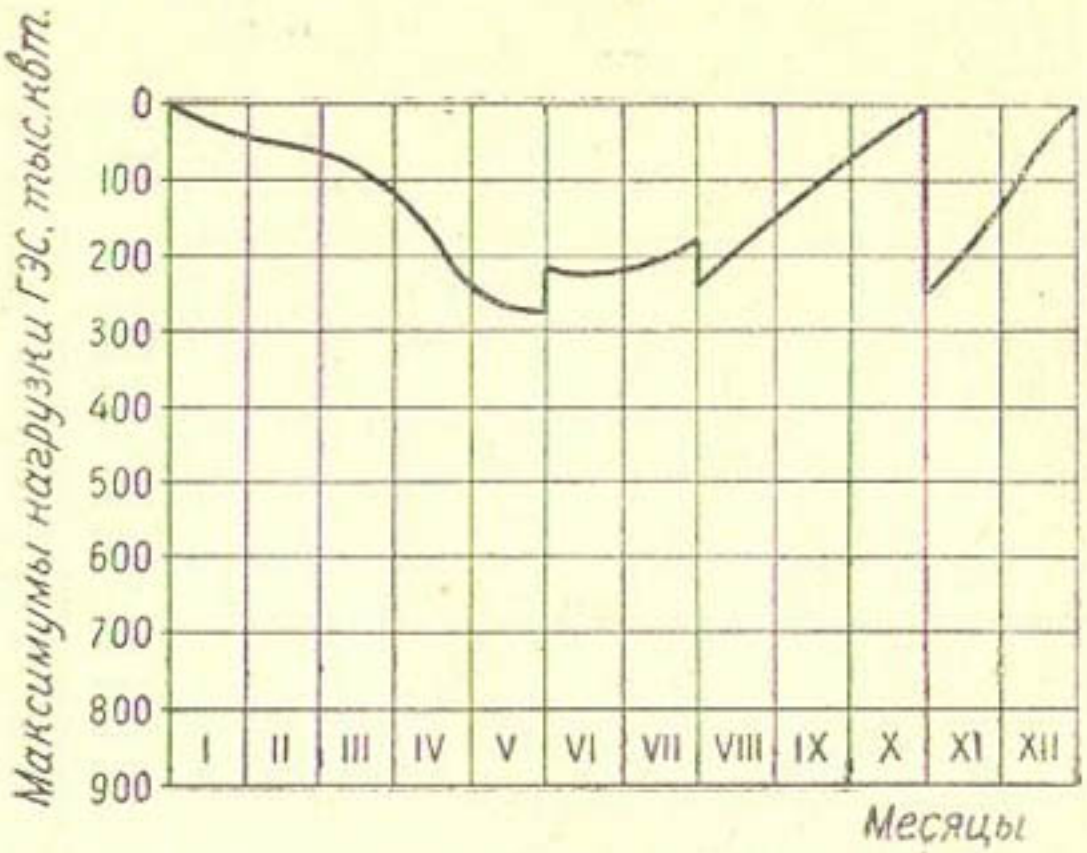


Рис. 15. Расчетный график нагрузки проектируемых ГЭС.

ставляющими зависимость между максимальной рабочей мощностью и необходимой при этой мощности выработкой энергии (средней мощностью) для каждого месяца. Откладывая на них сверху вниз по оси ординат максимальные мощности ГЭС (или суммы ГЭС энергосистемы), на оси абсцисс соответственно получим необходимые выработки энергии (средние мощности) для каждого рассматриваемого месяца.

Месячные интегральные кривые строятся следующим образом. По суточным графикам нагрузки (начиная с пика) определяется необходимая выработка энергии для всего месяца и откладывается на оси абсцисс. За начало отсчета при построении этой зависимости принимается значение максимальной пиковой мощности данного месяца. Для экономии места месячные интегральные кривые могут быть построены с некоторым наложением друг на друга («в нахлест»). На рис. 16 показаны такого рода кривые для пиковой части графика нагрузки энергосистемы, приведенного на рис. 14.

§ 3. Распределение расчетного графика нагрузки гидроэлектростанций системы между участвующими в ней ГЭС

Задача распределения нагрузки между участвующими в энергосистеме гидроэлектростанциями должна разрешаться таким бразом, чтобы они смогли полезно использовать всю выделенную для них воду, а неизбежные потери энергии на

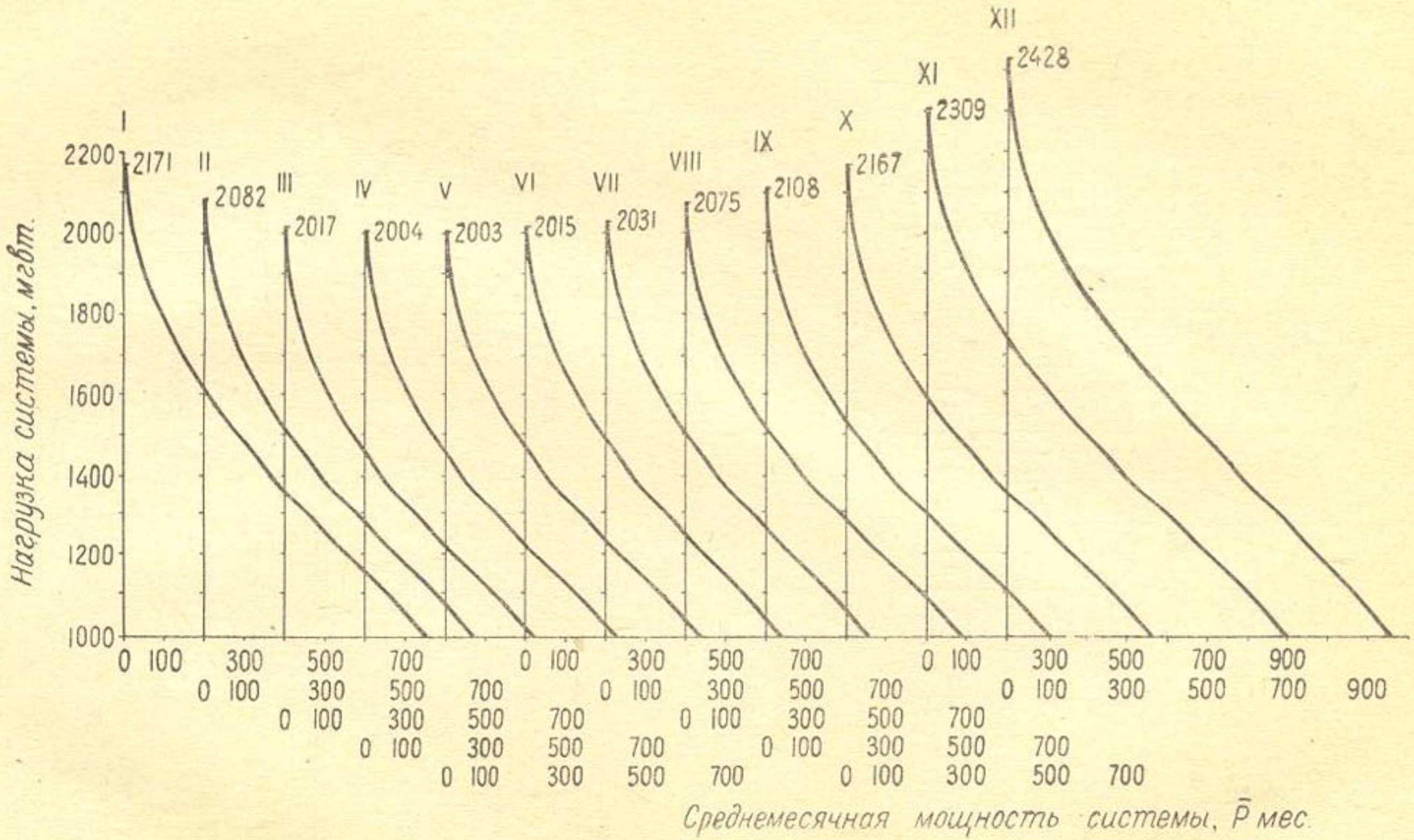


Рис. 16. Месячные интегральные кривые графика нагрузки энергетической системы.

транзитных расходах при сработке водохранилищ могли бы быть сведены к минимуму. При этом необходимо:

во-первых, суточный график нагрузки энергосистемы распределить между гидроэлектростанциями так, чтобы самую верхнюю (наиболее пиковую) часть графика занимали станции, наиболее приспособленные к суточному регулированию стока, т. е. станции, приводящие к минимальным потерям энергии при суточном регулировании;

во-вторых, выбрать такую очередность сработки водохранилищ сезонного регулирования, которая приводит к минимальным потерям воды на испарение и фильтрацию и энергии транзитных расходов при снижении напора ГЭС;

в-третьих, выбрать такую предельную глубину сработки водохранилищ, которая обеспечивала бы максимум выработки энергии на ГЭС и не приводила бы к дефициту мощности в энергосистеме.

1. Место ГЭС в суточном графике нагрузки энергосистемы

Место ГЭС в суточном графике нагрузки энергосистемы определяется целым рядом факторов — величиной свободной мощности ГЭС, количеством воды, которым располагает ГЭС в рассматриваемые сутки, величиной бассейна для суточного регулирования стока, характеристикой нижнего бьефа ГЭС и его способностью воспринимать резкие колебания уровня воды и т. д. В большинстве своем эти факторы являются переменными во времени и, следовательно, об определенном месте ГЭС в суточном графике нагрузки энергосистемы можно говорить лишь для вполне определенного периода времени ее эксплуатации.

Срабатывая бассейн суточного регулирования ГЭС в течение одной секунды на глубину Δh (являющуюся практически весьма малой величиной), можно получить дополнительную выработку энергии

$$Э_в = \rho Q_{ср} (H - 0{,}5\Delta h - Q_{ср} z).$$

Однако на бытовых расходах при этом будут потери

$$Э_п = \rho Q_б \, 0{,}5\Delta h + \rho Q_б \, Q_{ср} z + \rho V \Delta h,$$

где $\rho = 9{,}81\eta$; η — к. п. д. ГЭС.

$Q_{ср} = П\Delta h$ — расход сработки бассейна, *м³/сек;*

H — напор ГЭС при бытовом расходе, *м;*

z — удельная величина повышения уровня нижнего бье-

фа ГЭС, вызываемая увеличением расхода воды на 1 $м^3/сек$;

$Q_б$ — бытовой (транзитный) расход реки, $м^3/сек$;

$П$ — средняя площадь зеркала водохранилища, $м^2$;

V — объем бытового стока, прошедший через ГЭС за период до восстановления этой малой сработки бассейна, $м^3$.

Отношение

$$K_{сут}=\frac{Э_п}{Э_п}=\frac{П(H-0{,}5\Delta h-Q_{ср}\zeta)}{Q_б\,(Пz+05)+V}$$

может явиться некоторым приближенным показателем энергетической эффективности суточного регулирования на ГЭС. Действительно, гидроэлектростанция с бóльшей величиной показателя $K_{сут}$ при одной и той же величине дополнительной энергии, получаемой за счет сработки водохранилища, приведет к меньшей величине потерь энергии на транзитных расходах, и, следовательно, суточное регулирование на ней энергетически более эффективно.

Этот показатель достаточно хорошо характеризует энергетическую эффективность суточного регулирования на ГЭС, но не отражает такие факторы, как динамику неустановившегося движения воды в нижнем бьефе, его способность воспринимать резкие колебания уровня воды, возможности использования ее ирригацией и т. д., которые могут оказать существенное влияние на выбор ГЭС для пиковой работы в системе. Поэтому предлагаемый показатель может применяться при выборе наиболее эффективной для суточного регулирования ГЭС только в случае равенства всех прочих факторов. Показатель $K_{сут}$ не учитывает также влияния к. п. д. ГЭС. Однако, с одной стороны, разница в к. п. д. гидроустановок, как правило, незначительна, с другой — потери энергии, приходящиеся на долю снижения средневзвешенного к. п. д., составляют лишь 10—15% от общих потерь. Основную долю (80—90%) потерь при регулировании на ГЭС составляют потери, вызываемые снижением напора [10].

Сравнение регулирующих способностей ГЭС и выбор места каждой из них (включая и проектируемую) в графике нагрузки энергосистемы могут быть сделаны по средним значениям показателя энергетической эффективности регулирования за сутки $K_{ср.сут}$. При этом могут быть приняты в расчет средние значения площади бассейна регулирования $П_{ср}$, расхода его сработки $Q_{ср}$, напора ГЭС $H_{ср}$, удельной величины

повышения уровня нижнего бьефа z и объема транзитного стока $V_{ср}$.

Рассматривая возможные режимы работы регулирующей ГЭС, можно выделить из них два предельных:

1. ГЭС работает несколько часов в сутки, покрывая только пик графика нагрузки, и использует за это время весь суточный объем воды. При этом на первых миллиметрах понижения уровня воды в бассейне регулирования потери энергии на транзитных расходах будут пропорциональны всему суточному объему используемой ГЭС воды ($V=V_{сут}$). На последних миллиметрах понижения (в самом конце периода сработки, после которого ГЭС будет остановлена) $V=0$. При определении среднего значения показателя $K_{ср.сут}$приближенно можно принять $V_{ср}=0{,}5V_{сут}$.

2. ГЭС работает полные сутки, и восстановление НПГ бассейна происходит к моменту начала его следующей сработки. В этом случае первые миллиметры сработки бассейна восстановятся последними (практически через сутки) и, следовательно, потери энергии на них будут также пропорциональны $V_{сут}$. Последние миллиметры сработки восстановятся сразу же после начала заполнения, и потери энергии на них будут близки к нулю. Так что и в этом случае среднее значение потерь энергии на транзитных расходах будет примерно пропорционально $0{,}5V_{сут}$. Учитывая, что показатели $K_{ср.сут}$подсчитываются для сопоставления энергетической эффективности суточного регулирования ГЭС системы, претендующих на одно и то же место в графике нагрузки, некоторая неточность в определении потерь не отразится на экономике энергосистемы. Если пренебречь половиной секундного снижения уровня верхнего бьефа ($0{,}5\triangle h$), выражение для определения среднего значения показателя энергетической эффективности суточного регулирования на ГЭС примет вид:

$$K_{ср.сут}=\frac{\Pi_{ср}(H_{ср}-Q_{ср}z)}{Q_б\,(\Pi_{ср}z+0{,}5)+0{,}5V_{сут}}\,. \qquad (27)$$

Факторы, не получившие отражения в уравнении (27), должны быть учтены особо. Так, например, недостаток свободной мощности на ГЭС при наличии большого количества воды, несмотря на большую величину показателя $K_{сут}$, может ограничить или сделать совсем нецелесообразным суточное регулирование стока на ГЭС. В этом случае ГЭС должна занять свое место в пике графика нагрузки энергосистемы только частью своей мощности, основная же ее часть должна рас-

положиться в базе графика с тем, чтобы предотвратить возможные сбросы воды.

2. Очередность сработки водохранилищ сезонного регулирования

При комплексном ирригационно-энергетическом использовании водных ресурсов вопросы выбора очередности сработки водохранилищ имеют особую актуальность в основном для энергетики, так как площади орошения, как правило, подвешиваются к строго определенным источникам, а сроки поливов не допускают (или почти не допускают) сдвигов во времени. В пределах допустимости забора воды на орошение не имеют значения для ирригации напоры воды, создаваемые водохранилищами. Единственным фактором, имеющим существенное значение для выбора очередности сработки ирригационных водохранилищ, является величина потерь стока на испарение и фильтрацию из них. Для уменьшения потерь в первую очередь должны срабатываться водохранилища, в которых они (потери) наибольшие. Однако этот фактор является в одинаковой степени существенным и обусловливает те же требования к очередности сработки водохранилищ и в энергетике.

Наиболее целесообразную с точки зрения уменьшения потерь энергии на бытовых расходах очередность сработки энергетических запасов воды в водохранилищах можно наметить исходя из следующих соображений. Очевидно, что первыми должны срабатываться верховые водохранилища, образованные плотиной, расположенной выше подпорного бьефа гидростанции, так как их сработка при регулировании стока не будет отражаться на напоре ГЭС, если не считать колебаний уровня нижнего бьефа, вызванных изменением пропускаемого расхода.

Из пристанционных водохранилищ системы в первую очередь следует срабатывать то водохранилище, понижение напора которого при той же выработке дополнительной энергии, получаемой за счет сработки, дает меньшую абсолютную величину потерь энергии на бытовых расходах. Потери же энергии на бытовых расходах пропорциональны величине понижения напора H, вызванного сработкой водохранилища, и величине проходящего при этом транзитного расхода Q.

Я. Н. Флексер [41] для энергетической характеристики пристанционного водохранилища ввел показатель экономичности

энергетического регулирования (терминология Я. Н. Флексера)*

$$K = \frac{ПН}{Q_б}, \tag{28}$$

где $Q_б$ — бытовой приток, проходящий через данную гидроустановку (в пределах пропускной способности турбин);

H — напор гидроустановки;

$П$ — площадь зеркала водохранилища.

Сущность этого показателя заключается в том, что эффективность регулирования повышается для ГЭС с большими значениями площади $П$ зеркала и напора H, т. е. с увеличением удельного запаса энергии, и уменьшается с увеличением бытового расхода реки в связи с использованием его при сниженных от сработки напорах ГЭС. Следовательно, в случае расположения регулируемых ГЭС на разных реках в первую очередь должно срабатываться водохранилище, обладающее наибольшим показателем К. Для случая каскадно расположенных водохранилищ он вводит поправку на величину расхода $Q_б$, поступающего из вышележащего водохранилища при его сработке. Формула, определяющая показатель эффективности энергетического регулирования водохранилищем, принимает вид

$$K = \frac{П}{Q_б + Q_п}. \tag{29}$$

Предлагаемая формула (29) не применима для случаев сомкнутых каскадов (т. е. каскадов со взаимным подпором гидроузлов), которые получают все большее распространение. Неприменимость формулы видна даже из простейшего анализа. Так, например, при отсутствии боковой приточности и примерно равных площадях свободной поверхности водохранилищ она всегда дает предпочтение первоочередной сработке верхнего водохранилища, в то время как это приведет к наибольшей потере в выработке энергии из-за снижения напора. Первоочередная сработка нижележащих водохранилищ не вызовет этих потерь, если пренебречь потерями напора в пределах водохранилища, вызванными уклоном его водной поверхности.

Определим последовательность сработки каскада взаимно подпертых водохранилищ ГЭС из условия достижения минимума потерь энергии. При этом примем, что весь расход сра-

---

* Точнее — показатель энергетической эффективности сработки водохранилищ.

ботки используется ГЭС даже и в том случае, если эта сработка вызвана необходимостью увеличения ирригационного попуска, используемого на орошение ниже ГЭС. Верхнее водохранилище (*B* 1, см. рис. 17) выгодно начинать срабатывать раньше, чем водохранилище *B* 2, если выработка энергии за достаточно малый период сработки $\Delta T = \Delta t_1 + \Delta t_2$, в течение которого расход Q практически можно считать по-

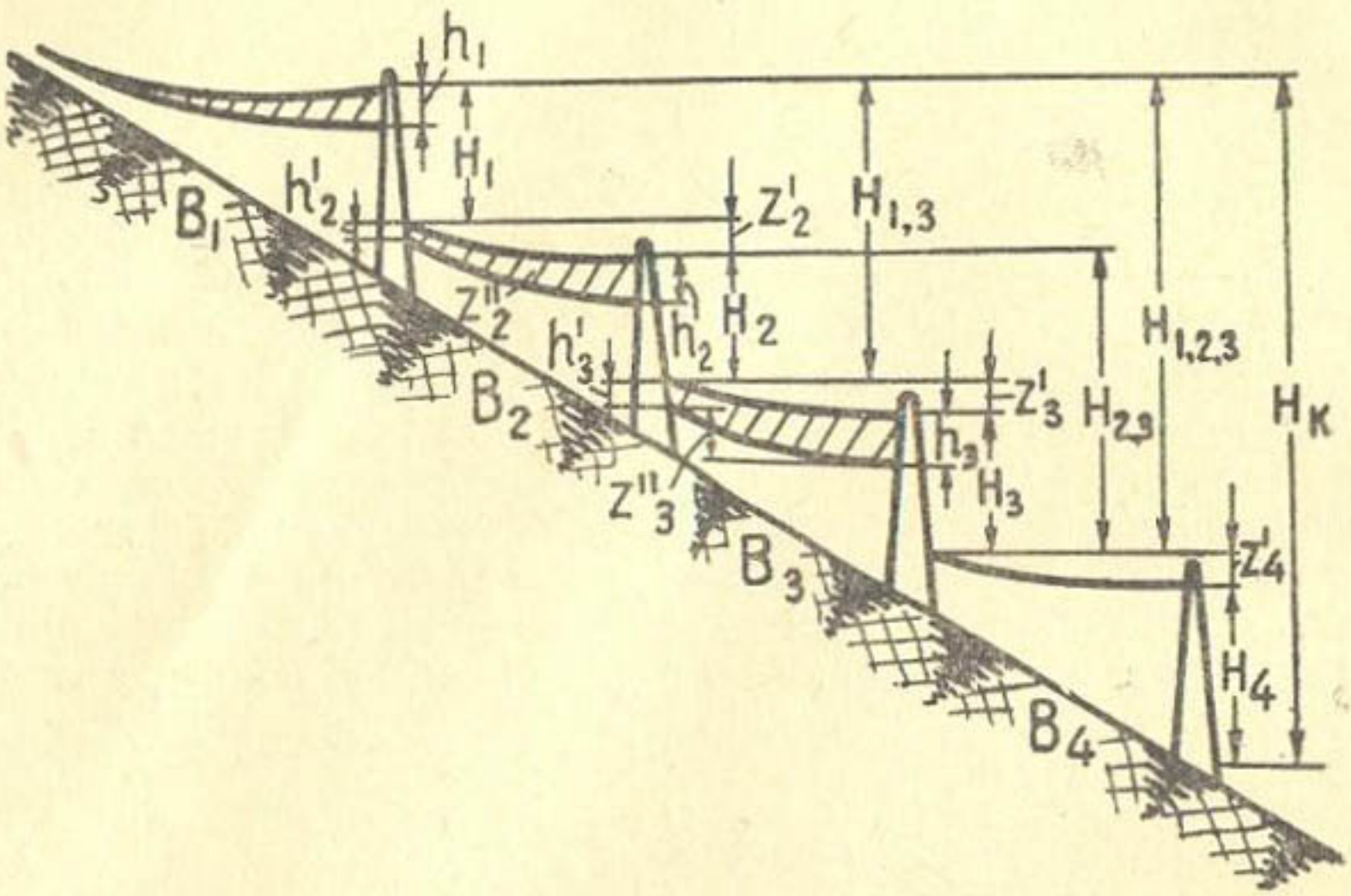


Рис. 17. Схема каскада ГЭС к выбору очередности сработки водохранилищ.

стоянным, получится больше, чем выработка при обратной последовательности. Учитывая, что кривая подпора верхнего водохранилища не влияет на велечину напора $H_к$ каскада, выработка энергии при сработке сначала водохранилища №1, а затем № 2 будет определяться выражением

$$Э_1 = \rho Q(H_{1,2} - \frac{h_1}{2} - z'_2 - \Delta z'_2)\Delta t_1 + \frac{\rho W_1}{\Delta t_1 \cdot 3600}(H_{1,2} -$$

$$- \frac{h_1}{2} - z'_2 - \Delta z'_2)\Delta t_1 + \rho Q'_{пр} H_2 \Delta t_1 + \rho Q(H_{1,2} - h_2 - z'_2 -$$

$$- \Delta z'_2)\Delta t_2 + \rho Q'_{пр}(H_2 - \frac{h_2}{2})\Delta t_2 + \frac{\rho W_2}{3600 \Delta t_2}(H_2 - \frac{h_2}{2})\Delta t_2.$$

Выработка энергии при обратной последовательности

$$Э_2 = \rho Q(H_{1,2} - z'_2 - \Delta z'_2)\Delta t_2 + \rho Q'_{пр}(H_2 - \frac{h_2}{2})\Delta t_2 +$$

$$+\frac{\rho W_2}{3600\cdot\Delta t_2}\left(H_2-\frac{h_2}{2}\right)\Delta t_2+\rho Q'_{пр}(H_2-h_2)\Delta t_1+\rho Q\left(H_{1,2}-\frac{h_1}{2}-z''_2-\right.$$

$$\left.-\Delta z''_2\right)\Delta t_1+\frac{\rho W_1}{3600\cdot\Delta t_1}\left(H_{1,2}-\frac{h_1}{2}-z''_2-\Delta z''_2\right)\Delta t_1;$$

где $\rho=9{,}81\eta_{ср}$; $\eta_{ср}$ — средний к. п. д. гидроустановок принят условно постоянным;

Q — бытовой расход в створе верхнего водохранилища;

$Q'_{пр}$ — боковая приточность в нижнее (из рассматриваемых) водохранилище (в случае забора воды из водохранилища, например, для орошения, принимается со знаком «минус»);

H_1; H_2 — напоры ГЭС № 1 и № 2;

$H_{1,2}$ — суммарный напор рассматриваемых водохранилищ с учетом потерь в пределах нижнего;

h_1 и h_2 — сработка верхнего и нижнего водохранилищ;

W_1 и W_2 — объемы сработок из водохранилищ за время Δt_1 и Δt_2;

Δt_1 и Δt_2 — время сработки водохранилищ в часах;

z'_2 — потери напора в пределах водохранилища № 2, вызванные уклоном его водной поверхности при бытовом расходе (с учетом боковой приточности) и наполненном водохранилище;

$\Delta z'_2$ — дополнительные потери напора, вызванные расходом $Q_{ср1}$ выпускаемым из вышележащего водохранилища;

z''_2 и $\Delta z''_2$ — то же, но при сработаном на глубину h_2 водохранилище.

Потери напора в нижнем бьефе ГЭС-2 не учитываются, так как величина их сохраняется неизменной независимо от последовательности сработки.

Условием выгодности первоочередной сработки верхнего водохранилища является $Э_1>Э_2$ или (после сокращений)

$$-Q(z'_2+\Delta z'_2)\Delta t_1-\frac{W_1}{3600\cdot\Delta t_1}(z'_2+\Delta z'_2)\Delta t_1-Qh_1\Delta t_2>$$

$$>-Q(z''_2+\Delta z''_2)\Delta t_1-\frac{W_1}{3600\cdot\Delta t_1}(z''_2+\Delta z''_2)\Delta t_1-Q'_{пр}h_2\Delta t_1.$$

Так как в данном сопоставлении энергетических эффектов регулирования период сработки водохранилищ ΔT при-

нят малой величиной, в течение которой практически можно считать отдачу энергии равномерной и периоды сработки рассматриваемых водохранилищ пропорциональными их энергетическим запасам, получим:

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}=\frac{W_1(H'_1+H_2)}{W_2H'_2} \text{ где: } H'_1=H_1-\frac{h_1}{2};\ H'_2=H_2-\frac{h_2}{2}$$

$$\text{и } \Delta t_2=\Delta t_1\frac{W_2H'_2}{W_1(H'_1+H_2)}.$$

Тогда условие первоочередности сработки верхнего водохранилища будет иметь вид:

$$-(Q+\frac{W_1}{3600\cdot\Delta t_1})\ (z'_2+\Delta z'_2)\Delta t_1-Qh_1\Delta t_1\frac{W_2H'_2}{W_1(H'_1+H_2)}>$$

$$>-(Q+\frac{W_1}{\Delta t_1\cdot 3600})(z''_2+\Delta z''_2)\Delta t_1-Q'_{np}h_2\Delta t_1.$$

Учитывая, что $\frac{W_1}{h_1}=\Pi_{1cp}$, а $W_2=\Pi_{2cp}h_2$ и $\frac{W_1}{3600\cdot\Delta t_1}=Q_{cp1}$,

где Π_{cp} — средняя площадь свободной поверхности за период сработки;

Q_{cp1} — среднесекундный расход сработки верхнего водохранилища,

$$\frac{(Q+Q_{cp1})(z'_2+\Delta z'_2)}{\Pi_{2cp}h_2H'_2}+\frac{Q}{\Pi_{1cp}(H'_1+H_2)}<$$

$$<\frac{(Q+Q_{cp1})(z''_2+\Delta z''_2)}{\Pi_{2cp}h_2H'_2}+\frac{Q'_{np}}{\Pi_{2cp}H'_2}$$

или

$$\frac{Q}{\Pi_{1cp}(H'_1+H_2)}<\frac{Q'_{np}}{\Pi_{2cp}H'_2}+\frac{(Q+Q_{cp1})}{\Pi_{2cp}H'_2}\xi_2,$$

где

$$\xi_2=\frac{z''_2+\Delta z''_2-z'_2-\Delta z'_2}{h_2}- \qquad (30)$$

коэффициент, характеризующий собой среднее изменение относительной величины потерь напора в каскаде, вызванных уклоном водной поверхности при сработке водохранилища № 2 на глубину 1 *м* и расходе $(Q+Q_{cp_1})$, поступающим от вышележащей ГЭС.

Если принять во внимание, что сработка водохранилищ рассматривается за достаточно малый промежуток времени ΔT, в течение которого расход практически постоянен, отдача

энергии равномерна, а глубины сработки водохранилищ h_1 и h_2 очень малы, то без ущерба в точности можно считать $П_{1\,ср}=П_1$ начальному, $П_{2\,ср}=П_2$ начальному, $H'_1=H_1$ и $H'_2=H_2$. Тогда условие первоочередной сработки верхнего водохранилища при подпоре его нижележащим будет иметь вид:

$$\frac{П_1(H_1+H_2)}{Q} > \frac{П_2 H_2}{Q'_{пр}+\xi_2(Q+Q_{ср1})}. \qquad (31)$$

Повторив подобные рассуждения для водохранилища № 2 и 3 (рис. 17), можно определить, что водохранилище № 2 выгоднее срабатывать раньше, чем водохранилище № 3, если будет выполняться условие

$$\frac{П_2(H_2+H_3)}{Q'_{пр}+\xi_2 Q} > \frac{П_3 H_3}{Q''_{пр}+\xi_3(Q+Q^1{}_{пр}+Q_{ср2})}, \qquad (32)$$

где $Q''_{пр}$ — расход боковой приточности в створе водохранилища № 3;

ξ_3 — коэффициент потерь напора на кривой подпора в пределах водохранилища № 3.

Определение ξ_3 производится по уравнению, подобному (30). Величину ξ можно выразить и несколько иначе. Так как (см. рис. 18)

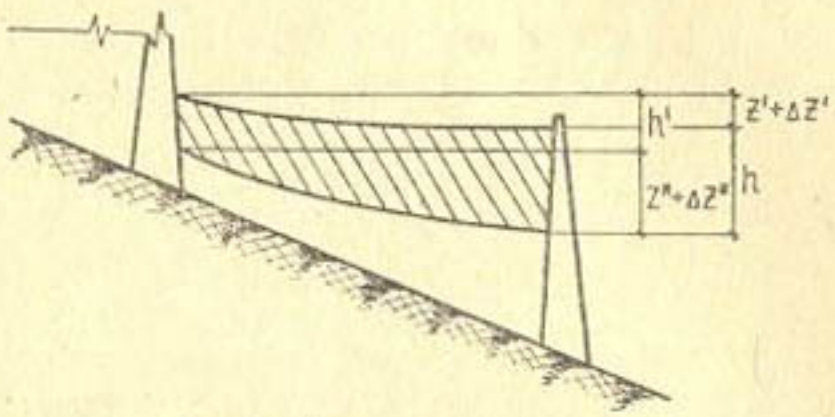


Рис. 18. К определению коэффициента потерь напора.

$$h+(z'+\Delta z')=h'+(z''+\Delta z'') \text{ или } z''+\Delta z''-z'-\Delta z'=h-h',$$

где h' — величина повышения напора вышележащей установки при сработке нижележащей на h,

$$\xi = \frac{z''+\Delta z''-z'-\Delta z'}{h} = \frac{h-h'}{h} = 1-\frac{h'}{h}. \qquad (33)$$

Величина коэффициента ξ потерь напора может изменяться от величины близкой к нулю, когда при сработке свободная поверхность водохранилища опускается почти равномер-

но (это характерно для широких и глубоких водохранилищ) и напор вышележащей установки повышается почти на величину сработки h, до единицы в случае взаимно не подпертых водохранилищ, когда кривая подпора выклинивается, не достигая вышележащей установки.

Из сопоставления условий первоочередности сработки водохранилищ, расположенных на разных реках (уравнение 28), на одной реке, но без взаимного подпора (уравнение 29) (предложены Я. Н. Флексером); двух верхних взаимно подпертых (уравнение 31) и нижних взаимно подпертых (уравнение 32) (предложены нами) видно, что последнее является общим для всех случаев. Так, если рассматриваются взаимно не подпертые водохранилища, то согласно (33) $\xi=1$, так как у взаимно не подпертых водохранилищ $h'=0$ и уравнение (32) примет вид уравнения (28) или (29).

Таким образом, в общем виде можно сказать, что первым в рассматриваемый достаточно малый интервал времени Δt должно срабатываться то водохранилище системы, которое обладает наибольшим показателем:

$$K=\frac{\Pi\Sigma H}{Q_{пр}+\xi\Sigma Q_{тр}}, \qquad (34)$$

где Π — площадь свободной поверхности водохранилища;

ΣH — полный напор, на котором срабатывается данное водохранилище (за вычетом потерь напора в нижних бьефах);

$Q_{пр}$ — расход боковой приточности, поступающей в рассматриваемое водохранилище (или забираемой из него);

$\Sigma Q_{тр}$ — суммарный расход, поступающий от вышележащей установки;

ξ — коэффициент потерь напора при сработке водохранилища, определяющийся по уравнению (33).

Сопоставление показателей K должно быть произведено:

а) когда сработка вызывается необходимостью покрытия дефицита энергии — для всех водохранилищ энергосистемы;

б) в случае недостатка воды для орошения — только для тех водохранилищ, из которых может быть осуществлено орошение дефицитного по воде сельскохозяйственного массива.

Если учесть, что уравнение (34) выведено путем сопоставления выработки энергии при разных последовательностях сработки и приведением ее к одному и тому же интервалу времени Δt (сокращенному из обеих сторон неравенств 30 и 31), и представить его в виде

$$K' = \frac{\rho \Pi \Delta h \Sigma H}{(\rho Q_{пр} \Delta h + \rho \xi \Delta h \Sigma Q) \Delta t} = \frac{\Delta Э_в}{\Delta Э_п}, \qquad (34^1)$$

то при $\Delta t = 1$ *сек* K представляет собой безразмерную величину и показывает, во сколько раз секундная выработка энергии за счет сработки водохранилища больше потерь энергии на транзитном стоке за тот же отрезок времени.

По мере понижения уровня водохранилища величина показателя энергетической эффективности сработки K уменьшается (при постоянных бытовых расхода Q), так как, во-первых, уменьшается напор H и величина свободной поверхности Π, стоящие в числителе и, во-вторых, увеличивается величина коэффициента ξ, стоящего в знаменателе, ибо при том же расходе и меньшей глубине увеличиваются скорости течения в пределах водохранилища, а следовательно, увеличивается и уклон свободной поверхности.

Очевидно, что после того, как показатель K срабатываемого водохранилища станет равным соответствующему показателю других водохранилищ, следует начинать их совместную сработку и продолжать ее до тех пор, пока первое из них не достигнет предельной глубины сработки, и т. д. При этом условием интенсивности совместной сработки водохранилищ должно являться постоянное равенство их показателей K.

При комплексном ирригационно-энергетическом использовании стока сработка водохранилища иногда приводит не только к потерям энергии на транзитных расходах, но даже и к её выигрышу. Так, если забираемый из водохранилища на орошение расход $(-Q_{пр})$, уменьшающий транзитные расходы и соответствующие им потери энергии, будет больше или равен величине $\xi \Sigma Q_{тр}$ (см. уравнения 34 и 34^1), то общие потери энергии в каскаде ГЭС, вызываемые энергетической сработкой этого водохранилища, будут равны нулю или отрицательной величине (выигрыш энергии на вышележащей установке каскада, вызванный повышением ее напора при сработке нижележащего водохранилища, будет больше потерь энергии на транзитных расходах нижней ГЭС). Показатель энергетической эффективности сработки такого водохранилища становится отрицательной величиной.

Основным затруднением в определении величины показателя энергетической эффективности сработки водохранилища в каскаде гидроузлов является учет влияния кривизны кривой подпора на напор вышележащей установки, т. е. в определении величины ξ.

Оценка влияния кривизны подпора в пределах водохранилища важна не только для определения уменьшения общего напора каскада, но и для определения судоходных глубин, возможностей забора воды на орошение в различных створах водохранилища, а также для установления размеров ущерба, вызываемого затоплениями. С этой целью проектной практикой применяются «кривые расходов в условиях подпора» для отдельных створов водохранилища. При определении коэффициента ξ потерь напора такие кривые нужны для створа вышележащей плотины. На рис. 19 показаны та-

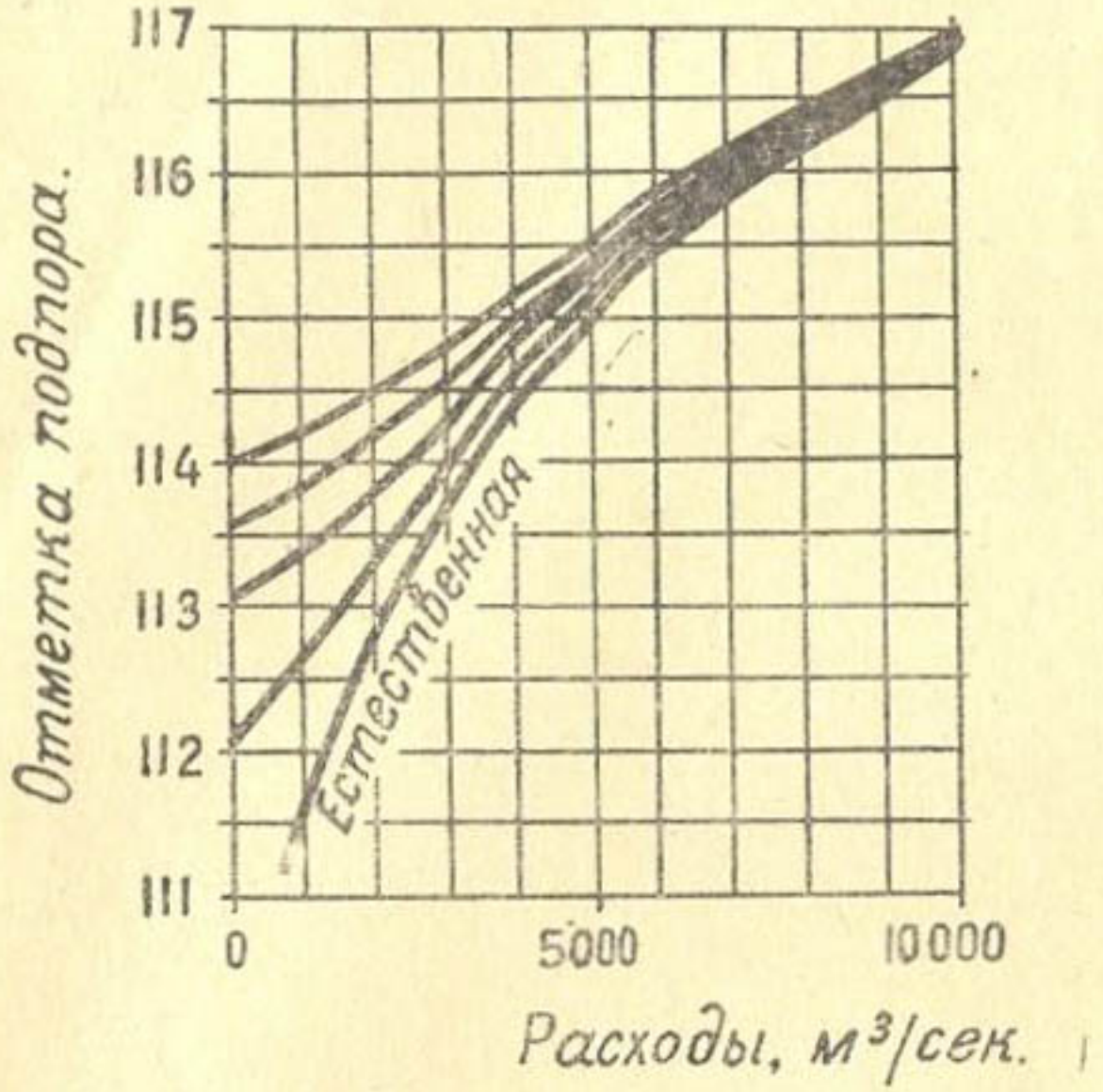


Рис. 19. Кривые расходов в створе ГЭС-I в естественных условиях и при подпоре ее водохранилищем ГЭСII (летний режим).

кого рода кривые расходов для створа ГЭС-I при подпоре водохранилища ГЭС-II. Чтобы определить горизонт воды в рассматриваемом створе, например, в конце ноября при общем расходе в нижнем бьефе ГЭС-I $Q_б + Q_{ср} = 1000$ *м³/сек* и уровне у плотины ГЭС-II равном $\nabla = 113$ *м*, надо снять искомый уровень с кривой, имеющей по оси ординат отметку 113 *м;* это будет 113,30 *м*. Следовательно, потери напора на кривой подпора в пределах водохранилища ГЭС-II при данном расходе ΣQ и отметке подпора ∇ составляют $z' + \Delta z' = 0{,}30$ *м*.

При измененной отметке подпора, например, на 1 *м*, т. е. при $\nabla = 112$ *м* и при том же расходе $\Sigma Q = 1000$ *м³/сек* потери напора на кривой подпора составят (см. рис. 19) $z'' + \Delta z'' = 0{,}58$. Следовательно, средний коэффициент потерь напора для верхнего метрового слоя сработки водохранилища ГЭС-II при расходе в нижнем бьефе ГЭС-I $\Sigma Q = 1000$ *м³/сек* будет равен

$$\xi = \frac{z'' + \Delta z'' - z' - \Delta z'}{h} = \frac{0{,}58 - 0{,}30}{1{,}0} = 0{,}28.$$

В зимний период года следует пользоваться соответствующими «зимними кривыми» или вводить поправку на добавочное трение о нижнюю кромку льда.

Полученная выше формула (34) не охватывает всего периода сработки водохранилищ и поэтому может только показать, какое водохранилище энергетической системы нужно срабатывать в каждый данный момент при существующих в это время напорах и бытовых расходах в створах ГЭС, чтобы в результате иметь максимальный энергетический эффект при заданном режиме получения энергии от сработки водохранилищ за весь период межени*.

Однако регулирование стока системой гидростанций, проведенное по принципу выбора оптимального режима сработки водохранилищ по отдельным интервалам времени, не всегда обеспечивает оптимум за весь период межени в целом. Оптимум будет достигнут, если гидрографы притока к регулирующим ГЭС системы однотипны, т. е. если повышение и понижение величин бытовых расходов притока происходит одновременно и в приблизительно равных соотношениях. Если же через сработанное водохранилище во второй половине периода межени пойдут повышенные расходы бытового стока (что приводит к увеличению потерь энергии в системе), а на ГЭС, водохраналище которой начинает срабатываться, расходы будут оставаться низкими, то может оказаться, что в

* Формула (34) не учитывает влияния на последовательность сработки водохранилищ величины возможных потерь стока на фильтрацию и испарение, хотя это может иметь некоторое значение. Так, ранние, короткие сроки сработки водохранилища в отношении уменьшения потерь стока на фильтрацию и испарение за весь цикл регулирования всегда выгодны. С точки зрения уменьшения потерь энергии, в первую очередь следует срабатывать водохранилище, для которого произведение $(\Phi + И)H$ имеет наибольшее значение. $(\Phi + И)$ — потери стока на фильтрацию и испарение, величина которых для района энергосистемы будет пропорциональна площади водохранилища П. Следовательно, зависимость (34) непосредственно не учитывает влияния потерь стока на фильтрацию и испарение, но и не противоречит их требованиям.

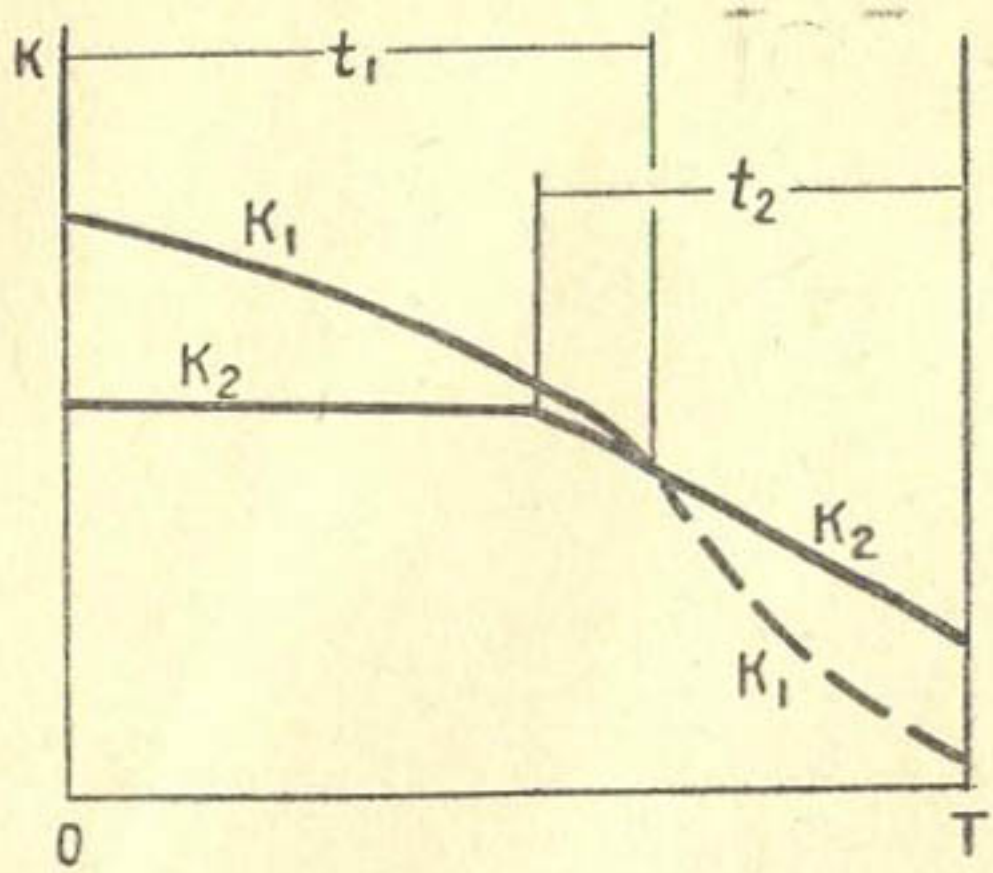


Рис. 20. Возможное изменение показателей К во времени при неоднотипных гидрографах притока транзитных расходов.

целом за межень более выгодным было бы первым срабатывать водохранилище с меньшим показателем эффективности сработки K в начале межени. Признаком этого будет вынужденное пересечение линий изменения показателей K (рис. 20). Показатель K сработанного водохранилища (при постоянном $П$ и H) из-за увеличения расходов Q будет снижаться и станет меньше соответствующего показателя срабатываемого в это время второго водохранилища.

В подобных случаях для выбора правильной последовательности сработки водохранилищ необходимо сопоставить эффективности сработки за межень в целом. Эффективность *достаточно малой* сработки водохранилища за межень может быть охарактеризована следующей величиной (подобно 34[1]):

$$K_т = \frac{\rho П H \Delta h}{\rho (Q_{пр.\,ср.взв.} \Delta h + Q_{ср.взв.} \xi \Delta h) T},$$

где $П$ — площадь зеркала водохранилища;

$Q_{пр.ср\,взв}$; $Q_{ср.взв.}$ — величины расходов боковой приточности и транзитного, средневзвешенные за период межени;

H и ξ — соответствующие им напор и коэффициент потерь напора при сработке.

$K_т$ покажет, во сколько раз энергия достаточно малого слоя водохранилища больше возможных потерь на транзитном стоке за период T, вызванных его сработкой.

Первым следует начинать срабатывать водохранилище, элементарная сработка, Δh которого даже в самом начале межени приводит к меньшим относительным потерям энергии. Потери же за период после сработки зависят не от распределения стока, а только от его объема ($V = Q_{ср.взв.} T$). Так как при выборе последовательности сработки сопоставление эффективностей сработки производится практически за один и тот же период времени T, то можно принять

$$K = \frac{\Pi \Sigma H}{Q_{пр.ср.вз.} + \xi Q_{ср.взв.}} \text{ или } K_т = \frac{\Pi \Sigma H}{V_{пр} + \xi V_{тр.}} \quad (35)$$

3. Выбор оптимальной глубины сработки водохранилищ

Задача выбора оптимальной глубины сработки водохранилищ в случае комплексного их использования связана обычно с решением вопросов технического осуществления забора воды из водохранилищ при глубокой их сработке, экономического обоснования заглубления водозаборных сооружений и каналов, определения технического и экономического эффекта от использования компонентами комплекса дополнительной воды и т. д., причем последний из указанных вопросов является одним из основных и наименее разработанных.

Определение экономического эффекта от использования в расчетном году дополнительного количества воды на орошение не представляет особых трудностей даже в случае компенсированного регулирования стока, так как его величина выражается весьма простой зависимостью в функции от дополнительно политой площади и средней урожайности культур на ней.

Значительно сложнее определение этого эффекта в энергетике, так как дополнительная сработка водохранилища в связи со снижением напора ГЭС может привести к отрицательному его значению — снижению общей выработки энергии и гарантированной мощности ГЭС.

В основном все существующие методы определения оптимальной по энергии глубины сработки пристанционных водохранилищ сезонного регулирования сводятся к решению тем или иным способом уравнения первой производной выработки энергии ГЭС за период регулирования по глубине сработки водохранилища $\frac{d\Э}{dh}$. Однако сложность решения этого

уравнения в практике заставляет прибегать к ряду допущений, наиболее распространенными из которых являются:

а) постоянство к. п. д. ГЭС при сработке и наполнении водохранилища,

б) постоянство расходов (бытовых и сработки из водохранилища),

в) линейность зависимости уровня нижнего бьефа ГЭС от расходов в течение всего периода регулирования и др.

Еще более усложняется решение этого уравнения при комплексном ирригационно-энергетическом использовании водохранилища в связи с тем, что такие водохранилища обычно часть периода сработки (в течение вегетации) работают по ирригационному графику, а часть (осенне-зимний период) — по энергетическому. Расчетом же обычно рекомендуется охватывать полный цикл регулирования (период с момента начала сработки водохранилища до его заполнения). Указанная рекомендация является, по нашему мнению, неверной, ибо, с одной стороны, она значительно усложняет расчеты, а с другой — приводит к ошибке. Покажем это на простейшем примере (рис. 21).

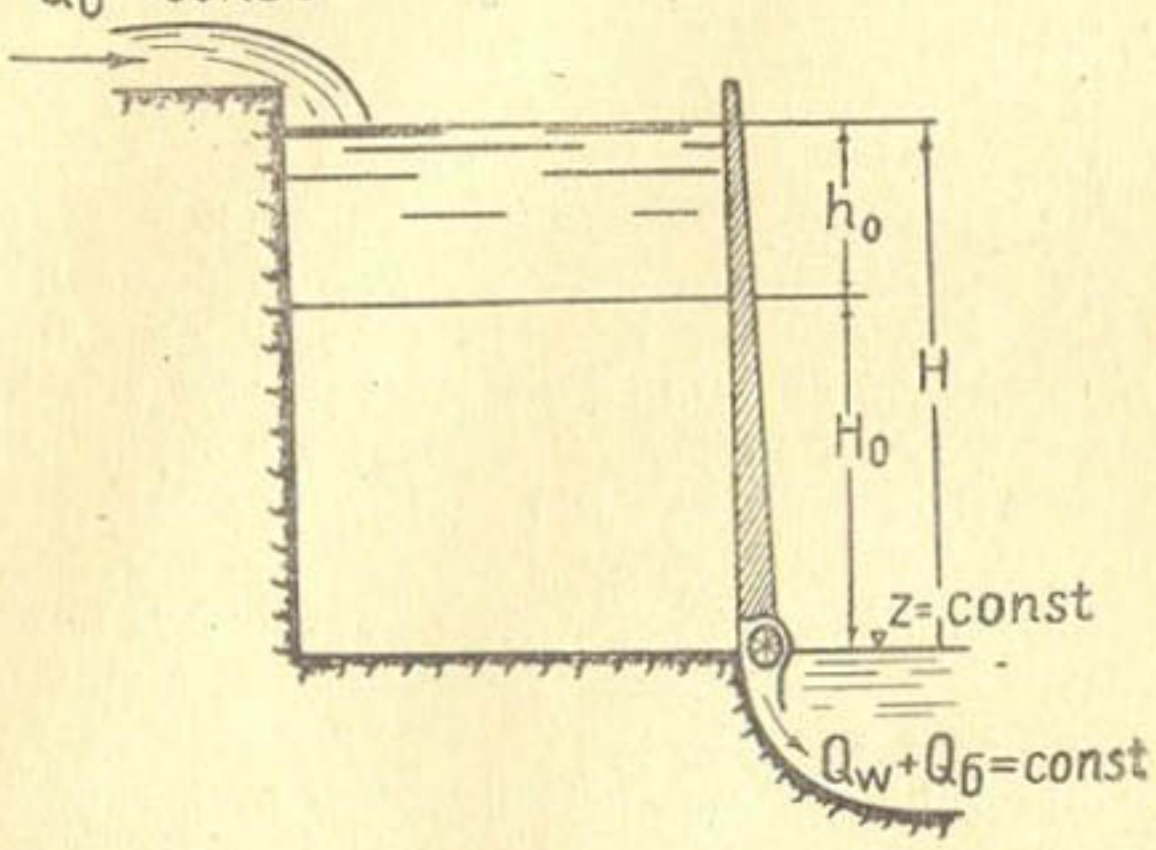


Рис. 21. Схема ГЭС к анализу методов выбора глубины сработки водохранилища.

Пусть водохранилище используется только в целях энергетики, имеет вертикальные стенки, уровень нижнего бьефа ГЭС не зависит от величины пропускаемых расходов, бытовые расходы реки и расходы сработки из водохранилища постоянны, к. п. д. ГЭС не зависит от напора и потери энергии

на бытовых расходах в течение периода наполнения водохранилища отсутствуют. В таком идеализированном случае выработка энергии ГЭС за период сработки водохранилища будет определяться весьма простым уравнением

$$Э = \rho(V + W)(H - 0{,}5h),$$

где ρ — коэффициент перевода энергии воды в киловатт-часы, учитывающий также к. п. д. ГЭС;

V — объем бытового стока реки за период сработки водохранилища T;

W — объем сработки из водохранилища;

H — напор ГЭС при НПГ;

h — глубина сработки водохранилища.

Оптимальную глубину сработки водохранилища h_0 определим общепринятым методом, дифференцируя

$$\frac{dЭ}{dh} = -0{,}5V + \frac{dW}{dh}H - 0{,}5\frac{dW}{dh}h - 0{,}5W$$

и приравнивая это все нулю. Учитывая, что $\frac{dW}{dh} = П$ и

$W = П \cdot h$ получим $h_0 = H - 05\frac{V}{П}$,

где $П$ — площадь зеркала водохранилища.

Принимая для нашего примера $H = 100$ *м*; $П = 4{,}86 \cdot 10^6$ *м*^{2}, период сработки водохранилища $T = 3$ месяцам, а бытовой расход реки $Q = 100$ *м*^{3}/*сек*, получим $V = 778 \cdot 10^6$ *м*^{3} и $h_0 = 20$ *м*.

По месяцам выработка энергии при принятой оптимальной глубине сработки $h_0 = 20$ *м* распределится следующим образом: $Э_1 = 62{,}04$ млн *квт·ч*; $Э_2 = 57{,}76$ и $Э_3 = 53{,}49$ млн *квт·ч*, всего за три месяца 173,29 млн *квт·ч*. Однако, если, сохранив сработку водохранилища в I и II месяцах, увеличить ее в III, например, на 10 *м* (рис. 22), то $h_3 = 16{,}67$ *м* и $Э_3 = 58{,}64$ млн *квт·ч*. Суммарная выработка ГЭС увеличивается до 178,44 млн *квт·ч* (выработка энергии за счет сработки водохранилища увеличится на 5,15 млн *квт·ч*, т. е. более чем вдвое по сравнению с выработкой за счет сработки первых 20 *м*). Оптимальная глубина сработки водохранилища для III месяца получается равной $h_0 = 60$ *м*. Для последнего полумесяца $h_0 = 86$ *м* и к концу периода регулирования при $T \to 0$; $V \to 0$ и $h \to 100$ *м*, т. е. если отвлечься от предшествующего режима и рассматривать последовательно уменьшающиеся перио-

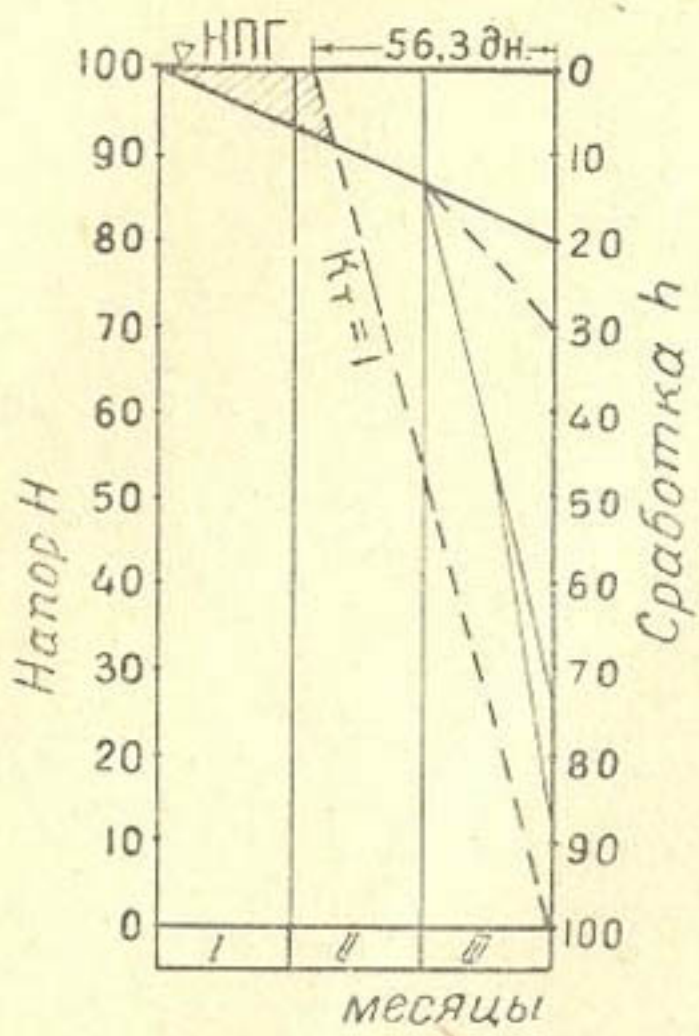


Рис. 22. Режим сработки водохранилища

ды сработки, наибольшую выработку в нашем примере даст не 20-метровая, а полная сработка водохранилища.

Чем объясняется это противоречие? Потери энергии на транзитных расходах даже при равномерном понижении уровня воды в водохранилище являются переменными во времени. Общие потери энергии на бытовых расходах от понижения уровня, например, на 1 *м* в первые месяцы сработки водохранилища могут в несколько раз превосходить таковые в последующие месяцы (в нашем примере в первом месяце они в среднем были в три раза больше, чем в третьем). Эта динамика изменения удельных потерь энергии не учитывается при определении оптимальной глубины сработки существующими ныне методами. Рассматривая же последовательно уменьшающиеся периоды сработки и отвлекаясь от всех предыдущих потерь, мы в какой-то степени учли эту динамику и получили более точные результаты.

Иногда в силу необходимости или по ошибке водохранилище в первые месяцы может срабатываться с ущербом для общей выработки за цикл регулирования (последующие потери энергии на бытовых расходах больше, чем выработка энергии от сработки водохранилища за эти месяцы). Если пользоваться существующими методами определения оптимальной глубины сработки, первая ошибка сразу же повлечет за собой следующую. Большие первоначальные потери энергии в общем цикле регулирования окажут влияние на выбор предельной глубины сработки в сторону ее уменьшения. При этом будет допущена вторая ошибка, приводящая к недоиспользованию запасов воды в водохранилище, что в свою очередь может вызвать дополнительные сбросы воды в паводок и новые потери энергии.

Из сказанного можно сделать вывод о том, что учет первоначальных потерь при выборе оптимальной (по энергии) глубины сработки не вносит уточнений и определять ее можно

непосредственно для конечного периода сработки водохранилища. При этом любая малая сработка водохранилища должна обеспечивать прирост в выработке энергии над всеми ее возможными потерями. Как только удельный прирост выработки энергии становится равным нулю, сработка должна быть прекращена; однако это не значит, что в последующем при сокращении периода опорожнения она не будет снова целесообразной.

Рассмотрим величину удельного прироста выработки энергии $\frac{d\Э}{dh}$ для промежуточного момента t_1, периода сработки T. Выработка энергии ГЭС при этом будет складываться из выработки за периоды $\triangle t_1$; t_2; $\triangle t_3$ (рис. 23). Учитывая, что рас-

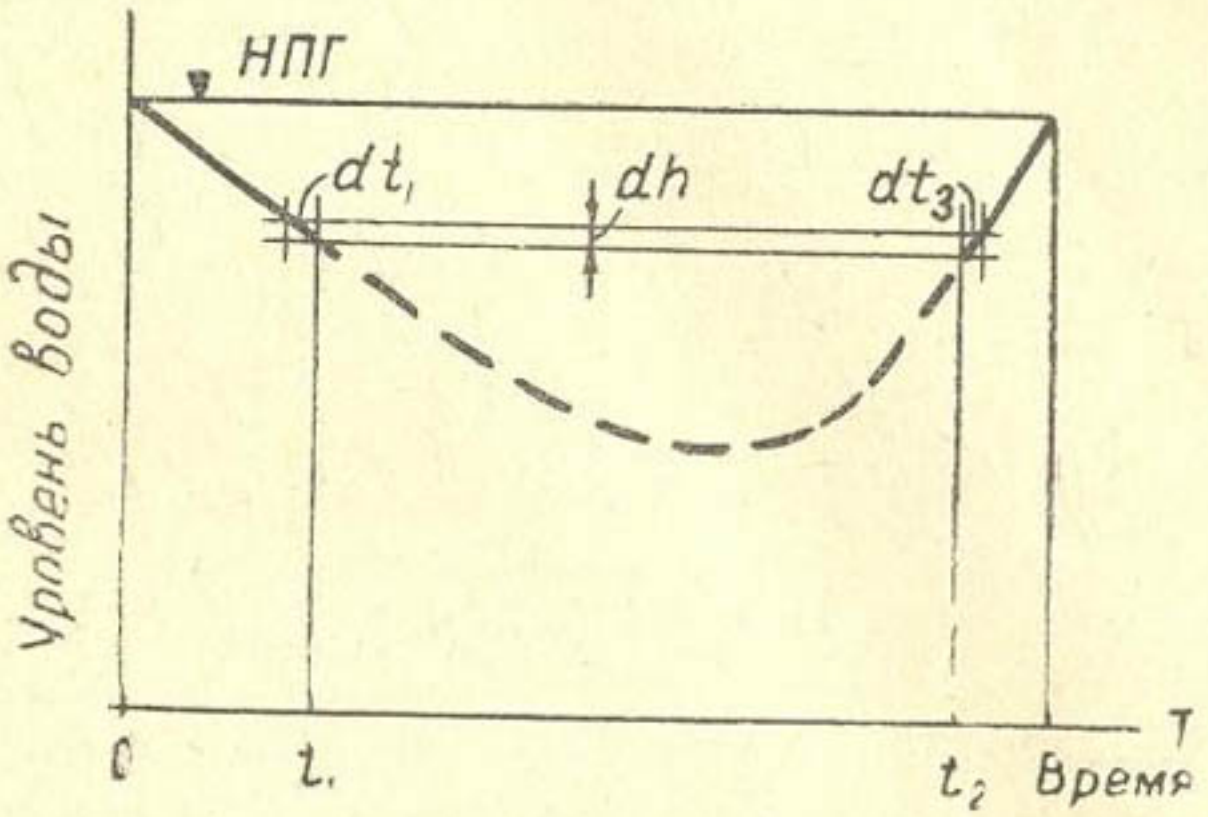


Рис. 23. К определению удельного прироста выработки энергии ГЭС при сработке ее водохранилища.

сматриваемая сработка происходит в течение малого отрезка времени $\triangle t_1$ и на малую глубину $\triangle h$, при определении выработки энергии ГЭС допущения о постоянстве к. п. д. η, расходов $Q_б$ и $Q_{ср}$, а также площади свободной поверхности водохранилища $П$ будут вполне приемлемы.

$$\Э = \rho(V_1 + W)(H - 0{,}5\Delta h - Q_{ср}z) + \rho\int_{t_1}^{t_2} Q_б\,(H - \Delta h)dt +$$

$$+ \rho V_3(H - 0{,}5\Delta h + Q_п z),$$

где V — объемы бытовых расходов;

W — объемы сработки;
$Q_б$ — бытовые расходы;
$Q_{ср}$ — расходы сработки из водохранилища:
$Q_п$ — средний расход, идущий на наполнение водохранилища за время Δt_3.

Учитывая, что $\int_{t_1}^{t_2} Q_б\,(H-\Delta h)dt=(H-\Delta h)\int_{t_1}^{t_2} Q_б\,dt=$

$$=V_2(H-\Delta h),$$

а также, что $Q_{ср}=\frac{W}{\Delta t_1}$; $\frac{V_1}{\Delta t_1}=Q_{б1}$; $\frac{V_3}{\Delta t_3}=Q_{б3}$; $\frac{dW}{dh}=П$

и $W=П\Delta h$, получим

$$\frac{dЭ}{dh}=\rho(-0{,}5V_1-Q_{б1}Пz+ПH-0{,}5П\Delta h-0{,}5П\Delta h-2Q_{ср}Пz-$$

$$-V_2-0{,}5V_3+Q_{г3}Пz)$$

или

$$\frac{dЭ}{dh}=\rho(ПH-П\Delta h-Q_{ср}Пz)-\rho(0{,}5V_1+V_2+0{,}5V_3+Q_{б1}Пz-$$

$$-Q_{г3}Пz+Q_{ср}Пz).$$

Следовательно, если в рассматриваемый момент времени

$$\rho(ПH-П\Delta h-Q_{ср}Пz)-\rho(0{,}5V_1+V_2+0{,}5V_3+Q_{б1}Пz-Q_{г3}Пz+$$

$$+Q_{ср}Пz)>0$$

или $K_т=\frac{\rho П(H-\Delta h-Q_{ср}z)}{\rho[0{,}5V_1+V_2+0{,}5V_3+Пz(Q_{б1}+Q_{ср}-Q_{г3})]}>1$, (36)

то удельный прирост полезной выработки энергии $\frac{dЭ}{dh}>0$ и сработка водохранилища все еще приводит к увеличению выработки энергии. Сработка должна быть прекращена в момент, когда $K_т$ станет равным единице. При этом $\frac{dЭ}{dh}=0$.

Учитывая, что вблизи оптимальной глубины сработки водохранилища кривая изменения выработки энергии ГЭС пре-

терпевает незначительные изменения (изменение аргумента всякой непрерывной функции в области ее экстремальных значений приводит к незначительному изменению самой функции), некоторое отклонение от оптимальной глубины сработки не вызовет больших потерь энергии. Поэтому, идя на некоторое упрощение выражения (36), показатель энергетической эффективности сработки можно записать в следующем виде:

$$K_т = \frac{П(H - Q_{ср} z)}{V + П z Q_б}, \qquad (37)$$

где $П$ — площадь зеркала водохранилища в рассматриваемый момент времени, *км²;*

H — напор ГЭС в этот момент (при уровне нижнего бьефа, соответствующем бытовому расходу воды), *м;*

$Q_{ср}$ — расход сработки из водохранилища в этот момент, *м³/сек;*

z — удельная величина повышения уровня нижнего бьефа, *м/м³/сек.;* $z = \frac{\Delta Z}{\Delta Q}$ характеризует собой некоторую среднюю величину крутизны кривой зависимости между расходом воды и уровнем нижнего бьефа ГЭС в интервале величин расходов, типичных для периода сработки водохранилища;

$Q_б$ — бытовой расход реки в рассматриваемый момент сработки водохранилища, *м³/сек;*

V — объем бытового стока реки за период, начиная с рассматриваемого момента и до момента восстановления этого элементарного снижения напора, млн *м³*.

Потери энергии на бытовых расходах за период наполнения водохранилища (объем стока ГЭС за период наполнения) в зависимости (37) не должны учитываться в случаях, когда снижение напора ГЭС, вызванное сработкой водохранилища в межень, приводит к сокращению сбросов воды, а мощность ГЭС, необходимая по графику нагрузки энергосистемы, в этот период обеспечивается. Такие случаи, как правило, имеют место на ГЭС с неглубоким сезонным регулированием стока.

Нетрудно убедиться, что в случае незначительности колебаний уровня нижнего бьефа ГЭС показатель энергетической эффективности сработки водохранилища будет равен

$$K_т = \frac{ПH}{V}. \qquad (38$$

В случае расположения водохранилища в каскаде гидроузлов он примет вид

$$К_т = \frac{П \Sigma H}{V_{пр} + \xi V_{тр}} \tag{39}$$

и в случае значительных колебаний уровней в нижних бьефах гидроэлектростанций каскада

$$К_т = \frac{П(\Sigma H - Q_{ср} \Sigma z)}{V_{пр} + \xi V_{пр} + Q_г \overline{П \Sigma z + \Sigma (Q_{пр} П \Sigma z)}}, \tag{40}$$

где ΣH — суммарный напор гидроэлектростанций каскада, использующих сток из рассматриваемого водохранилища;

$Q_{ср} \Sigma z$ — сумма потерь напора в нижних бьефах ГЭС каскада;

$V_{пр}$ — объем боковой приточности в водохранилище (или объем забираемой из него воды);

$V_{тр}$ — объем расходов, поступающих от вышележащей ГЭС (с учетом объема сработки вышележащих водохранилищ);

ξ — коэффициент потерь напора в каскаде, вызванных увеличением уклона водной поверхности срабатываемого водохранилища;

$Q_г$ — расход воды, проходящей через турбины ГЭС в рассматриваемый момент;

$$\Sigma (Q_{пр} П \Sigma z) = Q_{пр_1} П \Sigma^{n_2} z + Q_{пр_2} П \Sigma^{n_3} z + \ldots + Q_{пр.n} П z_n$$

$Q_{пр.i}$ — расход боковой приточности (забора воды) в верхнем бьефе i-той (начиная от рассматриваемой) ГЭС каскада;

z_i — удельные повышения уровней нижнего бьефа гидростанций;

n — число ступеней каскада, использующих сток из рассматриваемого водохранилища.

Сравнивая полученные показатели энергетической эффективности сработки (37, 38, 39, 40) с предложенными ранее для выбора наивыгоднейшей очередности сработки водохранилищ энергосистемы (28, 29, 34 и 35), видим, что они идентичны и различаются лишь по степени учета потерь энергии

в нижнем бьефе ГЭС для рассматриваемого момента опорожнения водохранилища. При определении предельной по выработке энергии глубины сработки водохранилища учет потерь должен производиться более точно, при выборе же очередности сработки водохранилищ детальный учет этих потерь не имеет особого значения, так как величина их остается примерно постоянной независимо от принятой очередности.

Величина коэффициента потерь напора (в выражениях 39 и 40) определяется по средним взвешенным во времени транзитным расходам воды рассматриваемого водохранилища и ГЭС за период регулирования. Методика его определения описана выше.

Вернувшись теперь к рассмотренному нами ранее примеру определения оптимальной глубины сработки водохранилища (рис. 21), можно сделать вывод о том, что мы допустили ошибку, приняв его сработку в течение трех месяцев. Сработка водохранилища должна была начаться не ранее чем за $n=56{,}3$ дня до начала заполнения, так как только к этому моменту времени показатель энергетической эффективности сработки становится равным единице. Действительно, для нашего примера $K_т = \frac{ПН}{V} = 1$ при $ПН = V = Q_б \cdot 3600 \cdot 24 \cdot n$, откуда

$$n = \frac{ПН}{24 \cdot 3600 \cdot Q_б} = \frac{4{,}86 \cdot 10^6 \cdot 100}{24 \cdot 3600 \cdot 100} = 56{,}3 \text{ дня.}$$

Линия изменения предельной глубины сработки водохранилища ($K_т = 1$) во времени показана на рис. 22 пунктиром. Следовательно, принятая нами ранее сработка в течение первого и начала второго месяцев на глубину 8,5 *м* (см. рис. 22) в общем за цикл регулирования не только не дала увеличения полезной выработки энергии, а привела к потерям. Следует заметить, что ни один из предложенных ранее методов определения оптимальной глубины сработки водохранилищ не позволяет выявить подобного рода ошибку.

Сработка водохранилища по линии $K_т = 1$ в общем за цикл регулирования также не приведет к увеличению полезной выработки энергии, но и не уменьшит ее величину. Для увеличения выработки энергии необходимо срабатывать водохранилище по линии, расположенной выше лини $K_т = 1$. Однако стремление как можно дальше оторваться от линии $K_т = 1$ может и не дать ожидаемого результата, особенно в случае низконапорных ГЭС со значительными колебаниями уровня нижнего бьефа. Увеличение расходов при сработке во-

дохранилища в подобных случаях может привести к такому повышению уровня нижнего бьефа, при котором величина полезной выработки энергии уменьшится.

Построение нижней и верхней предельных линий сработки водохранилища, ограничивающих зону, в которой сработка водохранилища обеспечивает увеличение полезной выработки энергии, можно сделать для любого года заданной водности, если воспользоваться предлагаемым показателем энергетической эффективности сработки водохранилища $K_т$.

а) Предельная нижняя линия сработки водохранилища
(1 на рис. 24)

Как известно из вышеизложенного, предельная по энергии глубина сработки водохранилища (точка 0^1) может быть определена независимо от режима опорожнения, ибо при дости-

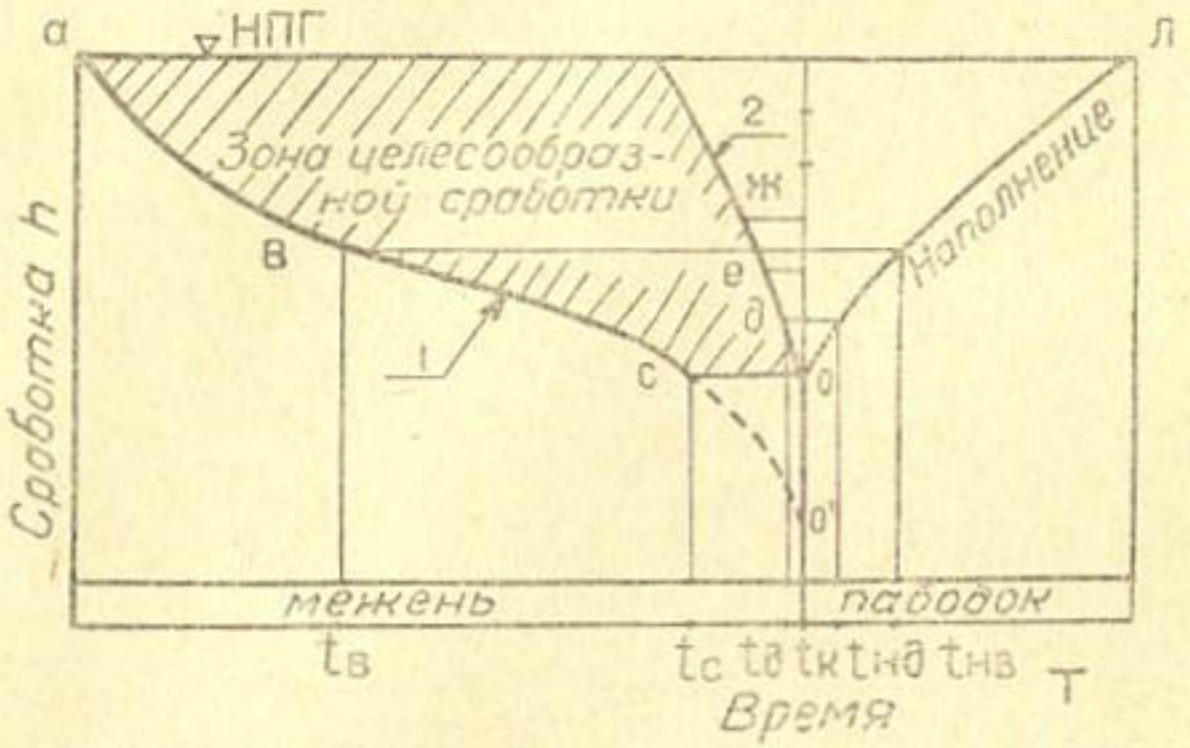


Рис. 24. К выбору оптимального режима сработки водохранилища.

жении этой глубины к моменту начала заполнения водохранилища имеет место равенство

$$K_{то'}=\frac{П_{о'}(H_{о'}-Q_{ср}z)}{Q_б\, П_о\, z}=1 \text{ (см уравн. 37)}$$

или $H_0'=(Q_б+Q_{ср})z$, т. е. к моменту начала заполнения водохранилища для получения максимальной выработки энергии его следует срабатывать до уровня воды в нижнем бьефе.

Однако такая сработка обычно является нецелесообразной из других, не энергетических соображений (из-за снижения

располагаемой мощности ГЭС, ее конструктивных особенностей, вероятности незаполнения водохранилища в очередной паводок и т. д.). Поэтому оптимальная предельная глубина сработки (точка *0*) должна выбираться с учетом и этих ограничений.

Предельная линия *а—в—с* характеризует собой такой режим, при котором даже небольшой расход сработки $Q_{ср}=min$ становится невыгодным, т. е. (при $Q_{ср}=0$)

$$K_т=\frac{ПН}{V+Q_б Пz}=1.$$

Положение точки «с» определит объем транзитного стока V за время $t_с—t_к$, при этом должно быть

$$П_о H_о=V_{ск}+Q_{бс}+П_о z.$$

Положение любой промежуточной точки «в» определит объем стока, прошедший через турбины ГЭС за время $t_в—t_{нв}$, при этом

$$П_в H_в=V_{вн}+Q_{бв}П_в z.$$

б) Предельная верхняя линия сработки
(2 на рис. 24)

Положение этой линии определится пропускной способностью турбин ГЭС или предельной величиной потерь энергии в нижнем бьефе.

Разделив выбранную оптимальную глубину сработки h_0 на несколько отрезков Δh, по топографической характеристике водохранилища $W=f(H)$ определим соответствующие им объемы воды ΔW. Для нижнего объема $\Delta W_д$ подберем такой максимальный расход (минимальное время $t_к—t_д$) сработки

$$Q_{ср.д}=\frac{\Delta W_д}{t_к-t_д},$$

при котором

$$П_д\,(H_д-Q_{ср.д}z)=V_{дн}+(Q_{дб}+Q_{ср.д})П_д z.$$

По расходной характеристике ГЭС для заданной отметки горизонта верхнего бьефа (точка *д*) определяется пропускная способность турбин $Q_{max.д}$. Если оказывается, что $Q_г=$

$=(Q_{бд}+Q_{ср.д})>Q_{max.д}$, то в пределах глубины 0—$д$ сработка определяется пропускной способностью турбин и время сработки объема $\Delta W_д$

$$(t_к - t_д) = \frac{\Delta W_д}{Q_{max.д} - Q_{бд}}.$$

Далее следует подобным же образом определить минимально допустимое время сработки объемов $\Delta W_е$; $\Delta W_{ж}$ и т. д. до НПГ.

§ 4. Выбор мощности и производительности компонентов ирригационно-энергетического комплекса при заборе воды на орошение из верхнего бьефа ГЭС

(I схема использования ресурсов реки)

Как отмечалось выше (гл. 1), практически возможные компоновки объектов комплексного ирригационно-энергетического использования водных и водноэнергетических ресурсов реки могут быть подразделены на 5 групп. Так как каждая из этих групп имеет примерно общую схему компоновки сооружений, общим, по-видимому, может быть и методический подход к выбору их параметров. К первой группе нами условно отнесены объекты с забором воды для орошения из верхнего бьефа ГЭС, причем независимо от того, могут или не могут они вести регулирование стока (I схема использования ресурсов реки). Рассмотрение вопроса выбора рабочих параметров ГЭС и орошения для этой схемы использования ресурсов реки удобно сделать на конкретном примере, учитывая, что в других подобных случаях методика расчетов останется той же. Пример принят условным, практически маловероятным, но простым, что позволит легче понять последующее изложение более сложных схем.

Пусть компоненты ирригационно-энергетического комплекса (рис. 25) имеют общие сооружения(плотину и водохранилище), забор воды на орошение производится из верхнего бьефа ГЭС, ГЭС обладает возможностями хорошего сезонного и неограниченного суточного регулирования.

Исходя из заданной схемы компоновки сооружений, подпорной отметки верхнего бьефа проектируемой ГЭС, ее регулирующих способностей, графика нагрузки энергосистемы и структуры генерирующих мощностей в ней, достаточно легко могут быть выбраны наиболее целесообразное место ГЭС в расчетном графике нагрузки энергосистемы и необходимые

для покрытия этого графика потребности в воде при любой мощности проектируемой ГЭС. Допущение необходимости задания подпорной отметки верхнего бьефа ГЭС следует считать вполне обоснованным, так как наивыгоднейшая ее величина может быть выбрана лишь при условии, что для каждого ее значения установлена наивыгоднейшая величина мощности ГЭС (см. ниже § 11).

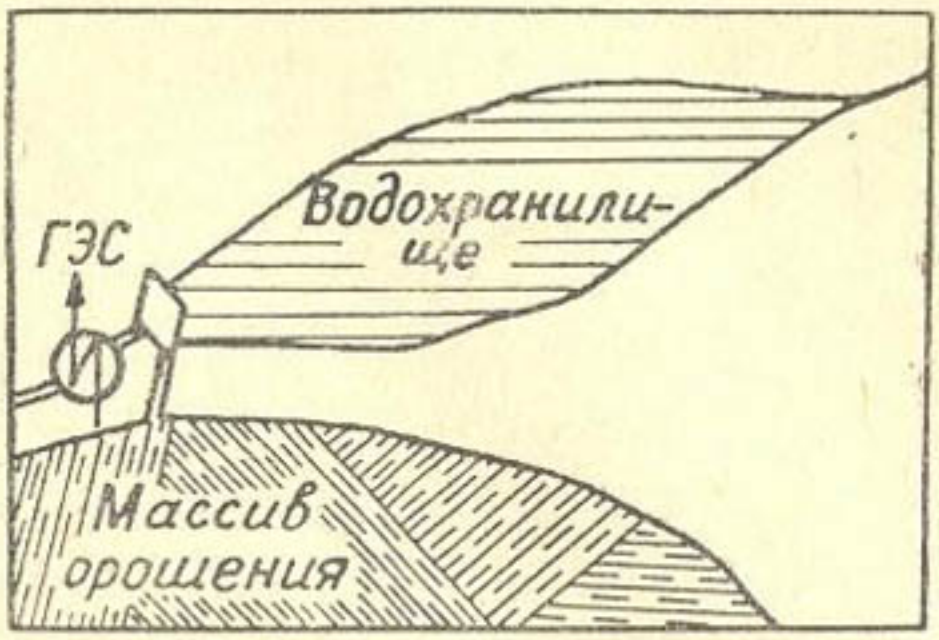


Рис. 25. Первая расчетная схема использования ресурсов реки

Рассматривая для примера в качестве расчетного график нагрузки энергосистемы, приведенный на рис. 14, соответствующие ему месячные интегральные кривые выработки энергии (средних месячных мощностей) (рис. 16) и считая, что проектируемая ГЭС по своим показателям в энергосистеме лучше всего подходит для работы в самом пике графика нагрузки (рис. 15), получим потребные пиковые и среднемесячные мощности ГЭС по месяцам расчетного года для нескольких значений рабочей мощности* (табл. 7).

Потребные среднемесячные расходы воды ГЭС при этом могут быть определены из выражения

$$Q_{ср.мес} = \frac{N_{ср.мес.}}{8H_{ср.мес.}} .$$

Величина среднего месячного напора ГЭС ($H_{ср.мес.}$) в каждом конкретном случае зависит от режима работы ГЭС, степени регулирования стока, расходной характеристики нижнего бьефа ГЭС, режима притока бытовых расходов реки, режима потребления воды смежными водопользователями и др.

---

* Максимальной мощности ГЭС, используемой в энергетической системе без дублирования ее другими электрическими станциями.

Потребные в графике нагрузки максимальная и среднемесячная

Рабочая мощность ГЭС, тыс. *квт*	I	II	III	IV	V	VI
200	200	160	140	80	—	—
	25	12	10	4	—	—
400	400	360	340	280	150	180
	105	82	78	51	10	20
500	500	460	440	380	250	280
	158	135	126	100	38	55

Учет влияния всех этих факторов на напор является весьма сложной задачей. Однако на предварительной стадии расчетов по определению целесообразности комплексного использования водных ресурсов и выбору примерных значений параметров сооружений некоторыми из них вследствие незначительности их влияния, в особенности на высоконапорных горных ГЭС Средней Азии и Кавказа, можно пренебречь, другие же учесть приближенно, задавшись примерным режимом сработки и наполнения водохранилища.

Приняв условно для нашего примера незначительные колебания бьефов и средний напор ГЭС $H = 125$ *м*, получим потребные средние месячные расходы воды ГЭС, приведеные в табл. 8.

На рис. 26 приведены графические зависимости величины рабочей мощности ГЭС (кривая 1) и ее выработки энергии (кривая 2) от величины годового потребления воды, построенные по данным табл. 7 и 8. Как видно из рисунка и таблиц, увеличение рабочей мощности ГЭС приводит к увеличению потребного для нее количества воды и, как следствие этого, к ограничению сельского хозяйства. Более полное удовлетворение требований на воду со стороны сельского хозяйства приведет к ограничению энергетики, вызовет необходимость искать заменяющую электрическую установку. В качестве заменяющей установки при расчетах выбора мощности ГЭС принимается дополнительная мощность и выработка электроэнергии технически передовой районной конденсационной электростанции. Вытесняемая мощность ГЭС должна быть заменена при этом энергетически эквивалентной мощностью КЭС.

Принимая в нашем примере, что 1 *квт* мощности ГЭС в

Таблица 7

мощности ГЭС, тыс. *квт*.

VII	VIII	IX	X	XI	XII	Число часов использования рабочей мощности ГЭС в году
15 1	50 2	130 10	200 25	70 3	200 30	363,78
215 29	250 38	330 75	400 100	270 50	400 90	1327,56
315 62	350 79	430 120	500 146	370 80	500 140	1807,15

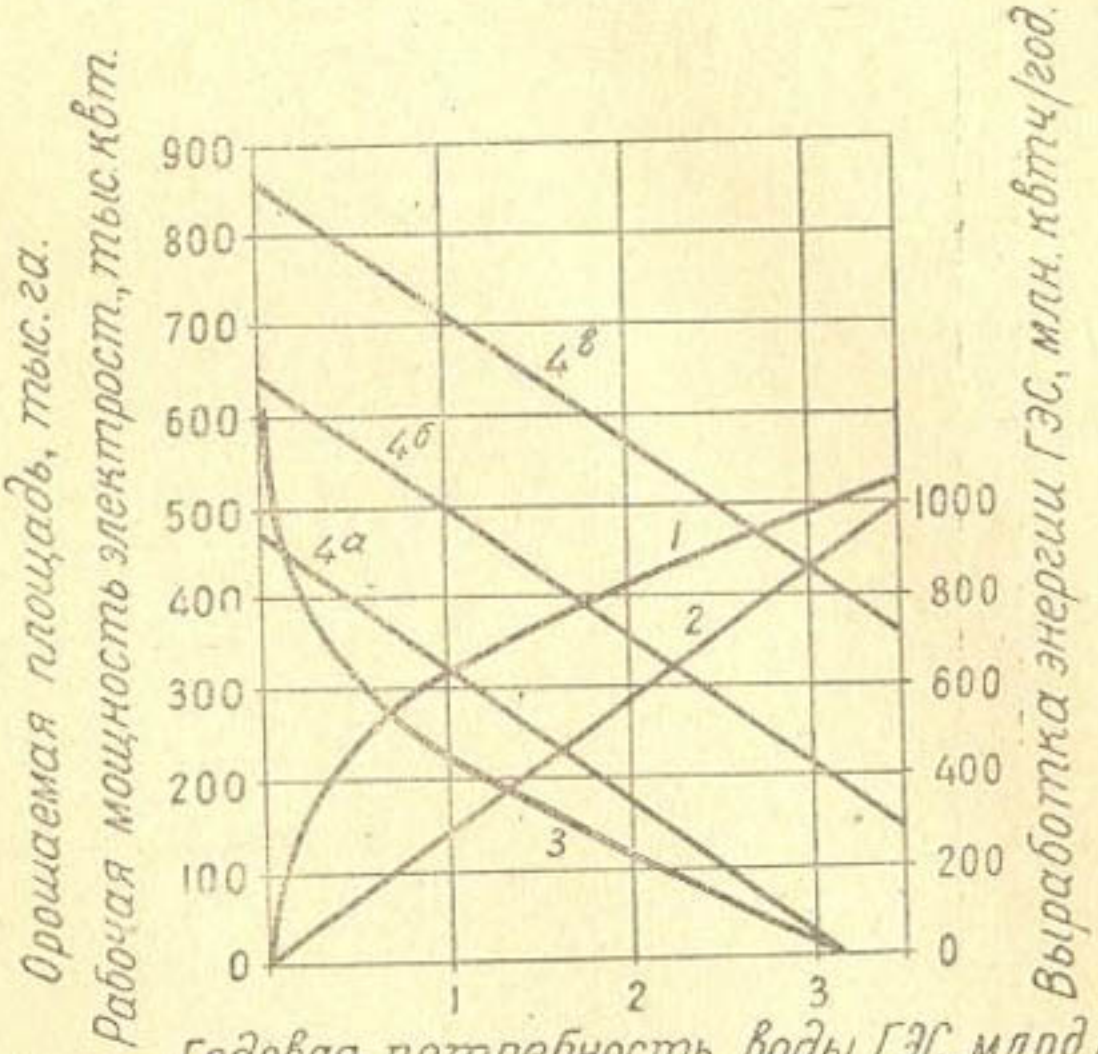


Рис. 26. Зависимости рабочей мощности *1* и выработки энергии 2 проектируемой ГЭС, мощности заменяющей КЭС *3* и площади орошения *4* от годовой потребности воды ГЭС для покрытия заданного графика нагрузки (для схемы I)

энергосистеме сможет быть заменен 1,2 *квт* мощности КЭС ($\alpha_N = 1{,}2$), а максимально возможная мощность проектирумой ГЭС (или потребность энергосистемы в дополнительной мощности к расчетному уровню) условно равна 500 тыс. *квт*, за-

Таблица 8

Потребные средние месячные расходы воды ГЭС, *м³/сек*

Рабочая мощность ГЭС, тыс. *квт.*	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Потребность воды ГЭС в год, млн. *м³*
200	25	12	10	4	—	—	1	2	10	25	3	30	322,4
400	105	82	78	51	10	20	29	38	75	100	50	90	1911,7
500	158	135	126	100	38	55	62	79	120	146	80	140	3253,0

висимость величины заменяющей мощности КЭС от годового количества воды, пропускаемого ГЭС, выразится на рис. 26 кривой 3*.

Анализируя баланс водных ресурсов реки в створе сооружения комплексного объекта для ряда лет, различных по водности, например в годы 99,9; 97; 75%-ой обеспеченности**, нетрудно подсчитать расходы воды, которые могут быть использованы для орошения при любой принятой мощности ГЭС, а также возможные площади орошения сельскохозяйственных угодий. Для рассматриваемой нами в этом параграфе схемы ирригационно-энергетического использования водных и водноэнергетических ресурсов реки расходы, возможные к использованию на орошение, определятся ежемсячной разностью бытового расхода и расхода, пропускамого ГЭС.

При отсутствии возможности сезонного регулирования стока реки на орошение смогут быть использованы в основном избытки воды только вегетационного периода года. Сопоставляя величины этих избытков воды на ГЭС по месяцам периода орошения с потребностью 1 среднего (структурного) гектара площади проектируемого массива орошения, определяемой укомплектованным графиком гидромодуля сельскохозяйственных культур, построенным для проектируемого массива, получим величину возможной орошаемой площади в каждом месяце. Меньшая из них и может быть принята в качестве расчетной для рассматриваемого года и заданной мощности ГЭС.

Наличие водохранилища сезонного регулирования стока при ГЭС позволит перераспределить часть годового стока реки с тем, чтобы покрыть недостатки воды в отдельные месяцы, повысив тем самым рабочую мощность ГЭС и увеличив использование стока для орошения.

Величины возможной площади орошения в зависимости от мощности ГЭС для лет разной водности могут быть выражены графически. Получающиеся в этом случае графические зависимости для лет, близких по водности, и при типовом внутригодовом распределении стока параллельны друг другу, что

---

*Как будет видно из дальнейшего изложения, величина максимально возможной мощности ГЭС в данных расчетах может быть принята произвольно. Приняв другую величину максимальной расчетной мощности ГЭС, мы не изменим форму кривой 3, а лишь переместим ее вдоль оси ординат параллельно самой себе, что не скажется на последующих расчетах.

** Рассматривать более многоводные годы часто оказывается нецелесообразным, ибо, как будет показано ниже, в подобных схемах использования водных ресурсов ГЭС мало конкурирует с орошением и допустимые попуски воды ГЭС не превышают водности маловодных лет.

значительно упрощает последующие экономические расчеты. Использование в расчетах реальных гидрографов практически не нарушает этой параллельности для рек Средней Азии в связи с наличием у них ярко выраженного подобия в распределении внутригодовых расходов лет разной водности [13]. Наличие возможностей сезонного регулирования стока только уточняет параллельность указанных зависимостей. При полном зарегулировании и использовании стока эти зависимости прямолинейны. Сбросы воды или ее использование на ГЭС для выработки сезонной энергии искривляют указанные зависимости, но параллельность их практически сохраняется.

Пусть для нашего примера водность реки в году 99,9; 97 и 75% обеспеченности характеризуется расходами, приведенными в графе 2, потребление воды на орошение структурного гектара проектируемого массива орошения по месяцам — в графе 3 (см. табл. 9а, 9б, 9в), а полезная емкость водохранилища W = 1400 млн $м^3$ ($\beta = 0{,}2$). Тогда возможные площади орошения, подсчитанные в табл. 9а, 9б, 9в для нескольких значений рабочей мощности ГЭС, будут равны (в тыс. *га*).

Таблица 9

В году р % обеспеченности	При мощности ГЭС, тыс. *квт*			
	0	200	400	500
99,9	462,6	416,5	189,5	—
97,0	638,0	542,1	365,0	168,1
75,0	852,0	806,1	579,0	387,4

Эти данные в виде графических зависимостей от расходов воды на ГЭС (от величины рабочей мощности ГЭС) изображены на рис. 26 кривыми 4а, 4б, 4в.

Полученные зависимости (рис. 26) рабочей мощности ГЭС, мощности заменяющей КЭС и орошаемой площади от величины годового пропуска воды ГЭС для лет различной водности могут быть представлены в стоимостном выражении, что позволит путем суммирования вложений в отдельные отрасли найти зависимость их от распределения водных ресурсов между компонентами комплекса. Минимум суммарных вложений покажет наивыгоднейшее распределение воды и соответствующие ему параметры сооружений.

Учитывая, что при сопоставлении вариантов использования водных ресурсов и выборе наивыгоднейшего из них доста-

Таблица 9а

Подсчет оросительной способности реки (I схема)

Месяц	Бытовой сток реки млн $м^3$	Потребность структурного гектара, $м^3$	$N_г$=0		$N_г$=200 *мгвт*				
			общая потребность орошения $м^3$	необходимая емкость водохранилища, млн. $м^3$	потребность ГЭС млн $м^3$	остаток воды млн $м^3$	можно оросить тыс. *га*	для этого нужно воды млн $м^3$	необходимая емкость водохранилища, млн $м^3$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
				Год 75% обеспеченности					
IV	674	875	745,6	1054,4	10,4	663,6	806,1	705,3	806,3
V	1020	875	745,6	1328,8	—	1020,0	806,1	705,3	1121,0
VI	1244	1750	1491,3	1081,5	—	1244,0	806,1	1410,7	954,3
VII	991	1750	1491,3	581,2	2,7	988,3	806,1	1410,7	531,9
VIII	581	875	745,6	416,6	5,4	575,6	806,1	705,3	402,2
IX	329	875	745,6	0	25,9	303,1	806,1	705,3	0
X	235	—	—	235,0	67,0	168,0	—	—	168,0
XI	205	—	—	440,0	7,8	197,2	—	—	365,2
XII	176	—	—	616,0	80,4	95,6	—	—	460,8
I	153	—	—	769,0	67,0	86,0	—	—	546,8
II	146	—	—	915,0	29,0	117,0	—	—	663,8
III	211	—	—	1126,0	26,8	184,2	—	—	848,0
Год	4839	7000	5965		322,4	4794,6		5642,6	
	1126					848,0			
	5965	852 т. *га*				5642,6			

Продолжение таблицы 9 а.

$N_г$=400 *мгвт*					$N_г$=500 *мгвт*				
6	7	8	9	10	6	7	8	9	10
132,2	541,8	579	506,6	35,2	259,2	414,8	387,4	339	75,8
26,8	993,2	579	506,7	521,7	101,8	918,2	387,4	339	655,0
51,8	1192,2	579	1013,3	700,6	142,6	1101,4	387,4	678	1078,4
77,7	913,3	579	1013,3	600,6	166,1	824,9	387,4	678	1225,4
101,8	479,2	579	506,7	573,1	211,6	369,4	387,4	339	1255,7
194,4	134,6	579	506,7	201,0	311,0	18,0	387,4	339	934,7
267,8	— 32,8	—	—	168,2	391,0	—156,0	—	—	778,7
129,6	75,4	—	—	243,6	207,4	—2,4	—	—	776,3
241,1	— 65,1	—	—	178,5	375,0	—199,0	—	—	577,3
281,2	—128,2	—	—	50,3	423,2	—270,2	—	—	307,1
198,4	— 52,4	—	—	—2,1	326,6	—180,6	—	—	126,5
208,9	2,1	—	—	+2,1	337,5	—126,5	—	—	0,0
1911,7	4254,3		4053,3		3253,0	3646,7		2712	
	—201,0					—934,7			
	4053,3					2712,0			

Таблица 96

Месяц	Бытовой сток реки млн $м^3$	Потребность среднего гектара $м^3/га$	$N_г$=0		$N_г$=200 *мгвт*				
			общая потребность орошения $м^3$	необходимая емкость водохранилища, млн $м^3$	потребность ГЭС млн $м^3$	остаток воды млн $м^3$	можно оросить тыс. *га*	для этого нужно воды млн $м^3$	необходимая емкость водохранилища, млн $м^3$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
			Год 97% обеспеченности						
IV	503	875	558,4	784,6	10,4	492,6	592,1	518,1	536,5
V	766	875	558,4	992,2	—	766,0	592,1	518,1	784,4
VI	933	1750	1116,7	808,5	—	933,0	592,1	1036,1	681,3
VII	745	1750	1116,7	436,8	2,7	742,3	592,1	1036,1	387,5
VIII	434	875	558,4	312,4	5,4	428,6	592,1	518,1	298,0
IX	246	875	558,4	0	25,9	220,1	592,1	518,1	0
X	177	—	—	177,0	67,0	110,0	—	—	110,0
XI	153	—	—	330,0	7,8	145,2	—	—	255,2
XII	131	—	—	461,0	80,4	50,6	—	—	305,8
I	112	—	—	573,0	67,0	45,0	—	—	350,8
II	109	—	—	682,0	29,0	80,0	—	—	430,8
III	158	—	—	840,0	26,8	131,2	—	—	562,0
Год	3627	7000	4467,0		322,4	3582,6		4144,6	
	840					562,0			
	4467	638 тыс. *га*				4144,6			

Продолжение таблицы 9 б.

$N_г$=400 *мгвт*					$N_г$=500 *мгвт*				
6	7	8	9	10	6	7	8	9	10
132,2	370,8	365	319,4	51,4	259,2	243,8	168,1	147,1	96,7
26,8	739,2	365	319,4	471,2	101,8	664,2	168,1	147,1	613,8
51,8	881,2	365	638,9	713,5	142,6	790,4	168,1	294,1	1110,1
77,7	667,3	365	638,8	742,0	166,1	578,9	168,1	294,1	1394,9
101,8	332,2	365	319,4	754,8	211,6	222,4	168,1	147,1	1400,0
194,4	51,6	365	319,4	487,0	311,0	—65,0	168,1	147,1	1187,9
267,8	—90,8	—	—	396,2	391,0	—214,0	—	—	973,9
129,6	23,4	—	—	419,6	207,4	—54,4	—	—	919,5
241,1	—110,1	—	—	309,5	375,0	—244,0	—	—	575,5
281,2	—169,2	—	—	140,3	423,2	—311,2	—	—	364,3
198,4	—89,4	—	—	50,9	326,6	—217,6	—	—	146,7
208,9	—50,9	—	—	0	337,5	—179,5	—	—	—32,8
1911,7	3042,3		2555,3		3253,0	2434,7		1176,6	
	—487,0					—1220,7			
	2555,3					1214,0			

Таблица 9в

Месяц	Бытовой сток реки, млн $м^3$	Потребность среднего гектара, $м^3/га$	$N_г=0$		$N_г=200$ *мгвт*				
			общая потребность орошения, млн $м^3$	необходимая емкость водохранилища, млн $м^3$	потребность ГЭС, млн $м^3$	остаток воды, млн $м^3$	можно оросить, тыс. *га*	для этого нужно воды, млн $м^3$	необходимая емкость водохранилища, млн $м^3$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
				Год 99,9% обеспеченности					
IV	366	875	404,8	573,2	10,4	355,6	416,5	364,4	325,2
V	554	875	404,8	722,4	—	554,0	416,5	364,4	514,8
VI	674	1750	809,4	587,0	—	674,0	416,5	729,0	459,8
VII	538	1750	809,4	315,6	2,7	535,3	416,5	729,0	266,1
VIII	315	875	404,8	225,8	5,4	309,6	416,5	364,4	211,3
IX	179	875	404,8	0	25,9	153,1	416,5	364,4	0
X	128	—	—	128,0	67,0	61,0	—	—	61,0
XI	111	—	—	239,0	7,8	103,2	—	—	164,2
XII	95	—	—	334,0	80,4	14,6	—	—	178,8
I	83	—	—	417,0	67,0	16,0	—	—	194,8
II	80	—	—	497,0	29,0	51,0	—	—	245,8
III	115	—	—	612,0	26,8	88,2	—	—	334,0
Год	2626	7000	3238,0		322,4	2581,6		2915,6	
	612					334,0			
	3238	462 тыс. *га*.				2915,6			

Продолжение таблицы 9 в

$N_г$=400 *мгвт*					$N_г$=500 *мгвт*	
6	7	8	9	10	6	7
132,2	233,8	189,5	165,7	68,1	259,2	106,8
26,8	527,2	189,5	165,8	429,5	101,8	452,2
51,8	622,2	189,5	331,6	720,1	142,6	531,4
77,7	460,3	189,5	331,6	848,2	166,1	371,9
101,8	213,2	189,5	165,8	896,2	211,6	103,4
194,4	—15,4	189,5	165,8	715,0	311,0	—132,0
267,8	—139,8	—	—	575,2	391,0	—263,0
129,6	—18,6	—	—	556,6	207,4	— 96,4
241,1	—146,1	—	—	410,5	375,0	—280,0
281,2	—198,2	—	—	212,3	423,2	—340,2
198,4	—118,4	—	—	93,9	326,6	—246,6
208,9	— 93,9	—	—	0	337,5	—222,5
1911,7	2041,3		1326,3		3253,0	+1565,7
	—715,0					—1580,7
	1326,3				Дефицит воды	— 15,0

точно установить относительную их экономичность, в сравниваемые варианты можно не включать постоянные слагаемые капитальных вложений и ежегодных эксплуатационных издержек. В рассматриваемой нами схеме комплексного ирригационно-энергетического использования водных ресурсов такими постоянными слагаемыми, не зависящими от распределения воды, будут вложения в общие сооружения — плотину, водохранилище, каналы и др. Поэтому оценкой их стоимости и ежегодных эксплуатационных издержек по ним на данном этапе расчетов можно не заниматься. Важно точнее оценить переменные затраты по отдельным компонентам комплекса. Такими переменными затратами по ГЭС и КЭС будут затраты, зависящие от величины их мощности. Удельные экономические показатели на единицу дополнительной их мощности можно принять при этом примерно постоянными, учитывая, что это является типичным для подобного рода предприятий (см. рис. 1).

Ограничение орошения с передачей воды на ГЭС вызывает необходимость искать другие источники орошения этих площадей или осваивать другие равнопродуктивные площади. Переход на новое орошение или новый массив требует бо́льших затрат (в противном случае он был бы основным и осваивался бы раньше рассматриваемого). Поэтому при экономических расчетах сравнения вариантов использования водных ресурсов реки одинаковую долю затрат в освоение основного и заменяющего гектара орошения можно также не рассматривать, следует учитывать только дополнительные капиталовложения и годовые эксплуатационные издержки в компенсирующие мероприятия на каждый гектар. Параллельность зависимостей площади орошения от потребления воды ГЭС в различные по водности годы (см. рис. 26) дает при этом одну для всех лет зависимость дополнительных затрат (рис. 27) и упрощает экономические расчеты.

Экономические расчеты по определению оптимальной мощности ГЭС могут быть сведены в данном случае к графическому решению условия

$$\Sigma З = \alpha_N з^{т}_N (P_{\circ} - N_{г}) + з^{г}_N N_{г} + з^{э}_{г} \overline{Э}_{д} - \alpha_{э} sb \overline{Э}_{г} + \Delta F \Delta з_{га} = min, \quad (41)$$

где $\alpha_N з^{т}_N (P_{\circ} - N_{г})$ — среднегодовые расчетные затраты по заменяющей КЭС;

P_0 — плановый прирост нагрузки энергосистемы;

$з^{г}_N N_{г}$ — среднегодовые расчетные затраты по проектируемой ГЭС, зависящие от ее мощности;

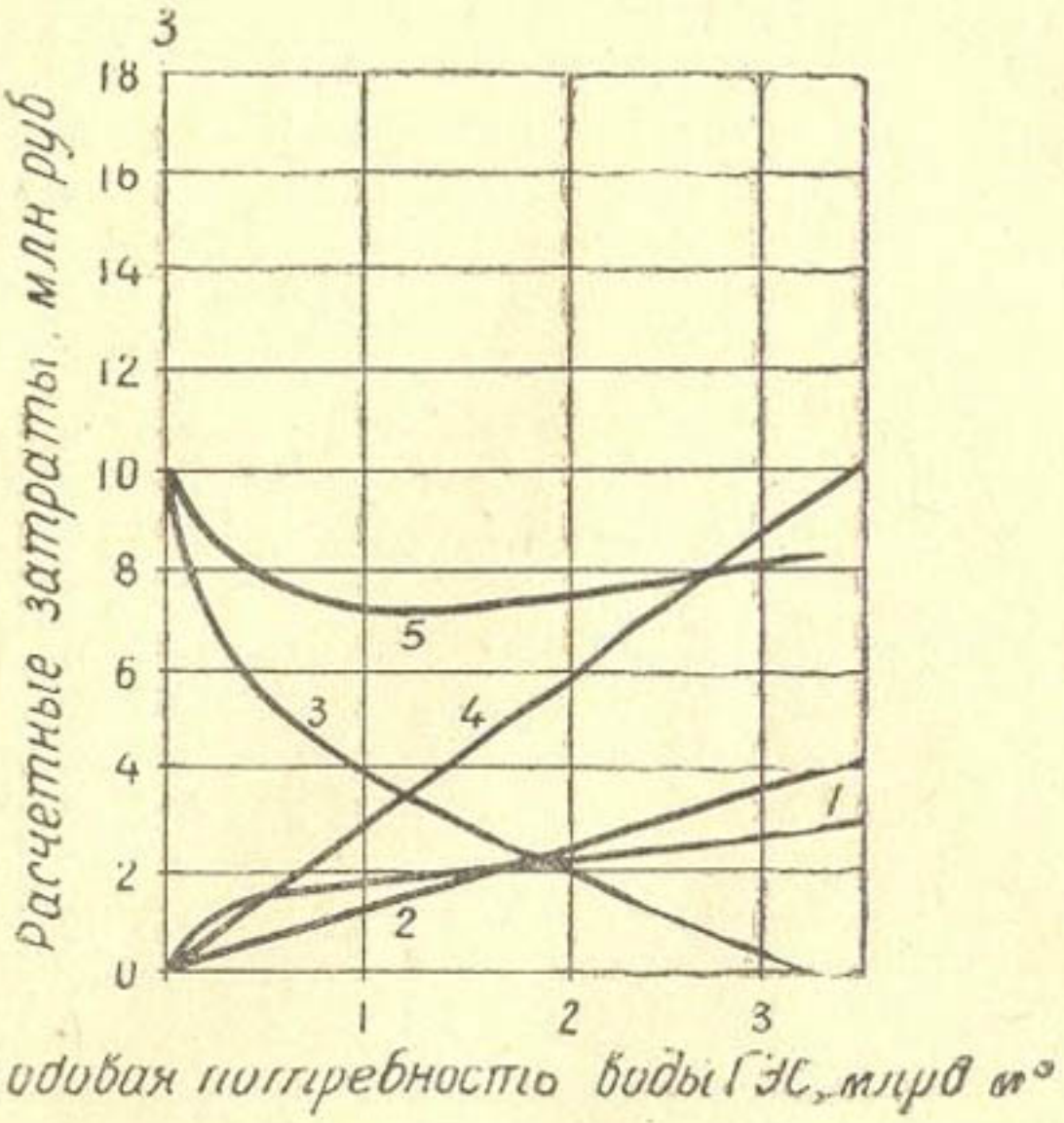


Рис. 27. Зависимости среднегодовых расчетных затрат в ГЭС *1*, сэкономленное топливо *2*, заменяющую КЭС *3*, дополнительных затрат в сельское хозяйство *4* и их суммы *5* от годовой потребности воды ГЭС (для схемы I)

$з^{э}_{д}\overline{Э}_{д}$ — среднегодовые расчетные затраты по компенсации дефицита энергии в системе;

$\alpha_{э}sb\overline{Э}_{г}$ — среднегодовая экономия затрат на топливо при сооружении ГЭС;

$\Delta F \Delta з_{га}$ — дополнительные среднегодовые расчетные затраты в сельском хозяйстве при компенсации снижения орошения в проектируемом комплексе заменяющим орошением.

Никаких дополнительных специальных расчетов по обоснованию обеспеченности работы ГЭС при этом не потребуется.

В уравнении (41) переменными являются мощность ГЭС $N_{г}$ и зависящие от нее средняя многолетняя выработка энергии $\overline{Э}_{г}$, возможный средний многолетний дефицит $\overline{Э}_{д}$, снижение площади орошения ΔF и потребная мощность заменяющей тепловой станции $(P_0 — N_{г})$.

Условие (41) получается из тех соображений, что если гид-

роэнергетика будет исключена из комплекса, то общие затраты для покрытия потребностей в электрической энергии и сельскохозяйственной продукции составят

$$\Sigma З' = З^{т}_{о} + \alpha_N P_о з^{т}_N + \alpha_э sb Э_о + З^{к}_{о} + F_о з_{га} + з^{сх}_{д} \overline{F}_д.$$

Если же в комплексе будет сооружена ГЭС мощностью $N_г$, то

$$\Sigma З'' = З^{т}_{о} + \alpha_N P_о З^{т}_N + \alpha_э sb Э_о + З^{к}_{о} + F_о з_{га} - \alpha_N N_г \, з^{т}_N - \alpha_э sb \overline{Э}_г +$$

$$+ N_г з^{г}_N + з^{э}_{д} \overline{Э}_д - \Delta F з_{га} + \lambda \Delta F з^{за\text{-}ж}_{га} + з^{сх}_{д} \overline{F}_д.$$

Для того чтобы установить, какие суммарные затраты меньше, достаточно сопоставить их без постоянных (одинаковых) слагаемых:

$$З^{т}_{о};\ Э_о;\ З^{к}_{о};\ F_о;\ з^{сх}_{д} \overline{F}_д,$$

где $З^{т}_{о}$ — среднегодовые расчетные затраты по ТЭС, не зависящие от ее мощности;

$Э_0$ — выработка энергии заменяющей ТЭС при мощности ГЭС равной нулю;

$З^{к}_{о}$ — среднегодовые расчетные затраты по комплексу, не зависящие от мощности ГЭС;

F_0 — площадь орошения при мощности ГЭС равной нулю;

$з^{сх}_{д} \overline{F}_д$ — среднегодовые расчетные затраты на компенсацию ущерба от недополивов сельскохозяйственных угодий.

Заменяющее орошение, компенсирующее снижение производства сельскохозяйственной продукции при увеличении рабочей мощности ГЭС в комплексе, должно иметь ту же степень надежности (обеспеченность орошения), что и сток, изымаемый для ГЭС. Только в этом случае сельское хозяйство в вариантах комплекса без гидроэлектростанции и с гидроэлектростанцией любой мощности будет находиться в сопоставимых условиях. Средняя многолетняя площадь недополивов ($\overline{F}_д$) и ущерб ($з^{сх}_{д} \overline{F}_д$), вызываемый ими, будут оставаться постоянными.

Как уже отмечалось, экономические показатели гидроэлектростанций и особенно экономические показатели освоения площади орошения резко индивидуальны для каждого объекта водохозяйственного строительства. Поэтому при всех эко-

номических расчетах, связанных с определением их оптимальных параметров, надлежит ориентироваться на конкретные сметные показатели по данному комплексному объекту.

Так, если в нашем примере сметными расчетами было установлено*, что удельные капиталовложения в дополнительный киловатт мощности проектируемой ГЭС составят $\kappa_N^г = 40$ *руб/квт*, а капиталовложения на дополнительный киловатт по возможной, характерной для данного района, заменяющей КЭС $\kappa_N^т = 100$ *руб/квт*, то удельные среднегодовые расчетные затраты по ГЭС $з_N^г = 0{,}14 \cdot \kappa_N^г = 5{,}6$ *руб/квт* и по КЭС $з_N^т = 0{,}17 \cdot \kappa_N^т = 17{,}0$ *руб/квт*. Ежегодная экономия затрат на топливе при сооружении ГЭС в энергосистеме будет $\alpha_э s b \overline{Э}_г$. Примем для нашего примера коэффициент сопоставимости выработки энергии ГЭС и КЭС $\alpha_э = (1 + \alpha^с \pm \alpha^л)$ равным 1,06; стоимость вытесняемоого топлива $s = 10$ *руб/т*; удельный расход топлива $b = 0{,}4$ *кг/квт·ч*.

Дополнительные среднегодовые расчетные затраты при переходе на заменяющее орошение примем равными $\Delta з_{га} = 0{,}1 \Delta к_{га} + \Delta с_{га} = 20$ *руб/га*. Площади основного и заменяющего массивов орошения примем условно равнопродуктивными ($\lambda = 1$).

Зависимости среднегодовых расчетных затрат в ГЭС, КЭС и орошение, полученные путем умножения графических зависимостей (см. рис. 26) мощности, выработки и снижения площади орошения на соответствующие условно принятые нами для примера стоимостные показатели, и их сумма приведены на рис. 27. Суммарная зависимость (кривая 5) получена в соответствии с уравнением (41) путем сложения затрат по ГЭС (кривая 1), КЭС (кривая 3), орошению (кривая 4) и вычитания экономии на топливе (кривая 2).

Как видно из рис. 27, минимум суммарных среднегодовых расчетных затрат на производство заданного количества продукции проектируемых предприятий (электрической мощности и энергии в энергосистеме и сельскохозяйственной продук-

---

* С учетом капиталовложений в смежные объекты и «замораживание» на период строительства.

чии в сельском хозяйстве) достигается при ежегодном выделении ГЭС 0,75 — 1,5 млрд $м^3$ воды. Рабочая мощность проектируемой ГЭС при этом должна быть 290 — 360 тыс. *квт* (см. рис. 26) с обеспеченностью ее использования в графике нагрузки энергосистемы выше 99,9%.

Величина орошаемой площади в годы различной водности будет характеризоваться кривой обеспеченности орошения, построенной по данным рис. 26 и приведенной на рис. 28. Окончательное установление наивыгоднейшей площади орошения (выбор ее расчетной водообеспеченности) производится методом, описанным в главе II.

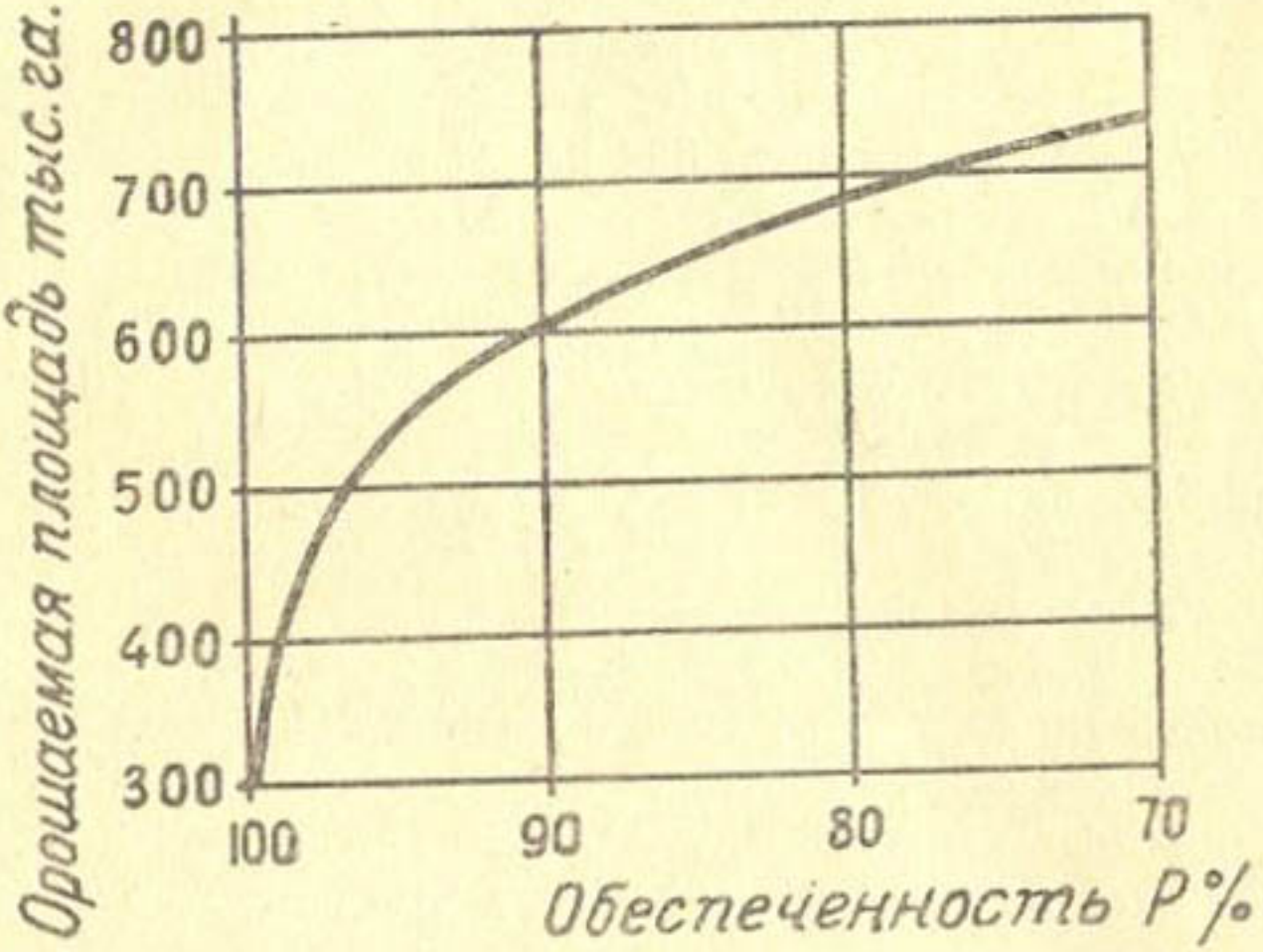


Рис. 28. Зависимость величины орошаемой площади от обеспеченности годового стока реки при мощности проектируемой ГЭС 320 тыс. *квт*

В схемах комплексного ирригационно-энергетического использования водных ресурсов реки весьма часто может иметь место необходимость в подаче воды для водоснабжения населенных пунктов. Считая, что такие компоненты обязательны, учет их влияния на выбор параметров ГЭС в рассматриваемой нами схеме комплексного использования реки и при заборе воды на водоснабжение из верхнего бьефа может быть произведен путем уменьшения ежемесячных бытовых расходов реки на величину соответствующих заборов воды. В дальнейшем методика расчетов останется прежней. В экономическом сопоставлении вариантов ирригационно-энергетического использования реки (рис. 27) водоснабжение не учи-

тывается, так как вложения в него не зависят от распределения воды между сельским хозяйством и энергетикой.

Из приведенного частного примера выбора параметров ГЭС и орошения при комплексном ирригационно-энергетическом использовании водных ресурсов можно сделать и весьма важный общий вывод. Нами рассматривалась эффективная высоконапорная ГЭС с относительно очень маленькими удельными капиталовложениями на дополнительный киловатт мощности (40 *руб/квт*) и числом часов использования ее рабочей мощности в году менее 900, т. е. станция для исключительно пикового режима работы в энергосистеме. Заменяющая тепловая станция — весьма дорогая (100 руб.* на дополнительных киловатт) и работает на относительно дорогом топливе (10 *руб/тут*), что также повышает эффективность ГЭС в энергосистеме. Дополнительные вложения в освоение заменяющих сельскохозяйственных площадей ($\Delta з_{га} = 20$ *руб/га* в год) относительно небольшие (по данным Д. Т. Зузика [15], их величина может достигнуть 250 руб. и более); следовательно, экономическая эффективность проектируемых мероприятий по выпуску сельскохозяйственной продукции мало отличается от компенсирующих. Это также является фактором, стимулирующим развитие мощности ГЭС. Однако при всех этих весьма благоприятных для ГЭС условиях она оказалась мало конкурирующей с орошением в требованиях на воду. Экономически целесообразные годовые попуски воды ГЭС в нашем примере составили всего около 1/3 годового стока реки 99,9% обеспеченности. При всех других, менее благоприятных условиях экономичность ГЭС снижается, и она становится еще менее конкурентноспособной. Так, при всех тех же экономических показателях ГЭС, КЭС и орошаемых площадей только перевод рассматриваемой ГЭС в полупиковую зону графика нагрузки энергосистемы с числом часов использования первого (верхнего в графике нагрузки) киловатта мощности ГЭС в году около 2400 делает ее вообще не конкурентноспособной с орошением.

Следовательно, во всех случаях комплексного ирригационно-энергетического использования водных ресурсов реки с забором воды на орошение из верхнего бьефа ГЭС и ее напоре менее 125 *м*, гидроэлектростанции, как правило, получаются малоконкурентноспособными в требованиях на воду по сравнению с орошением и специальные попуски воды для них,

---

* По данным ТЭП [25], максимальные удельные капиталовложения в перспективные тепловые станции мощностью 500 *мгвт* и более, принимаемые для сравнения с ГЭС, не превышают 100 *руб/квт*.

приводящие к ограничениям сельского хозяйства, должны быть тщательно обоснованы.

Использование гидроэлектростанцией избытков воды орошения в многоводные годы для выработки сезонной энергии повышает ее экономическую эффективность. Особенно большое количество сезонной энергии может иметь место в схемах комплексного использования реки с забором воды на орошение из нижнего бьефа ГЭС. При анализе этих схем мы и рассмотрим влияние сезонной энергии ГЭС на величину ее рабочей и установленной мощности.

§ 5. Выбор мощности и производительности компонентов комплекса при заборе воды на орошение из нижнего бьефа регулирующей ГЭС*

(II схема использования ресурсов реки)

Методика расчетов по выбору наивыгоднейших параметров ГЭС при комплексном использовании реки по этой схеме принципиально остается той же, что и для схемы I. Единственное изменение будет в подсчете величин возможной площади орошения, так как в данном случае площади располагаются

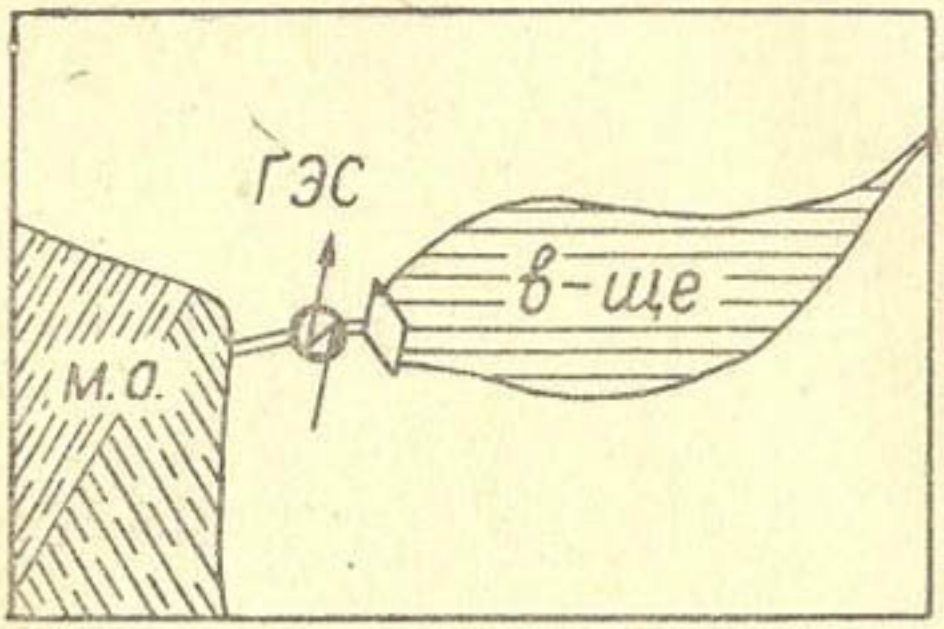


Рис. 29. Вторая расчетная схема использования ресурсов реки.

ниже ГЭС и прошедшая через нее вода в течение вегетационного периода года может быть использована на орошение.

---

* Отсутствие водохранилища для регулирования стока в подобной схеме компоновки комплексного ирригационно-энергетического объекта упрощает расчеты, сводя их к расчетам выбора параметров ГЭС и орошения без взаимного влияния друг на друга.

Таблица 10а

Подсчет оросительной способности реки (II схема)

Периоды	Месяц	Бытовой сток реки, млн $м^3$	Потребность среднего гектара $м^3/га$	$N_г=0$			$N_г=200$ *мгвт* $Q_г=520$ млн $м^3/мес$						
				возможное потребление орошения млн $м^3$	общая потребность орошения, млн $м^3$	необходимая емкость водохранилища млн $м^3$	потребность ГЭС, млн $м^3$	можно оросить этой водой, тыс. *га*	избытки, возможные к использованию для орошения млн $м^3$	дополнительно можно оросить, тыс. *га*	для этого нужно воды млн $м^3$	всего будет орошено тыс *га*	необходимая емкость водохранилища млн $м^3$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
				Год 75% обеспеченности									
Вегетационный	IV	674	875	674	745,6	1054,4	10,4	11,9	663,6	800,5	700,5	812,4	811,1
	V	1020	875	1020	745,6	1328,8	—	—	1020,0	812,4	710,9	812,4	1120,2
	VI	1224	1750	1244	1491,3	1081,5	—	—	1244,0	812,4	1421,7	812,4	942,5
	VII	991	1750	991	1491,3	581,2	2,7	1,5	988,3	810,9	1419,1	812,4	511,7
	VIII	581	875	581	745,6	416,6	5,4	6,2	575,6	806,2	705,5	812,4	381,9
	IX	329	875	329	745,6	0	25,9	29,6	303,1	728,8	685,0	812,4	0
Невегетационный	X	235	—	235	—	235,0	67,0	—	168,0	—	—	—	168,0
	XI	205	—	205	—	440,0	7,0	—	197,2	—	—	—	365,2
	XII	176	—	176	—	616,0	80,4	—	95,6	—	—	—	460,8
	I	153	—	153	—	769,0	67,0	—	86,0	—	—	—	546,8
	II	146	—	146	—	915,0	29,0	—	117,0	—	—	—	663,8
	III	211	—	211	—	1126,0	26,3	—	184,2	—	—	—	848,0
	Год	5965	7000	4839 1126	5965		322,4		4794,6 848,0		5642,6		
				852 тыс. *га*					5642,6				

$N_г$=400 *мвт* Q=1040 млн *м³/мес*							$N_г$=500 *мвт* Q=1560 млн *м³/мес*						
8	9	10	11	12	13	14	8	9	10	11	12	13	14
132,2	151,1	541,8	511,4	447,6	662,5	96,3	259,2	296,2	414,8	261,5	228,8	557,7	186,0
26,8	30,6	993,2	631,9	553,0	662,5	536,5	101,8	116,3	918,2	441,4	386,3	557,7	717,9
51,8	29,6	1192,2	632,9	1107,7	662,5	621,0	142,6	81,5	1101,4	476,2	833,5	557,7	985,8
77,7	44,4	913,3	618,1	1081,8	662,5	452,5	166,1	94,9	824,9	462,8	810,0	557,7	1000,7
101,8	116,3	479,2	546,2	477,9	662,5	453,8	211,6	241,8	369,4	315,9	276,4	557,7	1093,7
194,4	222,2	134,6	440,3	385,3	662,5	203,1	311,0	355,4	18,0	202,3	177,0	557,7	934,7
267,8	—	—32,8	—	—	—	170,3	391,0	—	—156,0	—	—	—	778,7
129,6	—	75,4	—	—	—	245,7	207,4	—	—2,4	—	—	—	776,3
241,1	—	—65,1	—	—	—	180,6	375,0	—	—199,0	—	—	—	577,3
281,2	—	—128,2	—	—	—	52,4	423,2	—	—270,2	—	—	—	307,1
198,4	—	—52,4	—	—	—	0,0	326,6	—	—180,6	—	—	—	126,5
208,9	—	2,1	—	—	—	2,1	337,5	—	—126,5	—	—	—	0
1911,7		4254,3 —201,0 4053,3		4053,3			3253,0		3646,7 —934,7 2712,0		2712,0		

Продолжение таблицы 10 а

$N_г$=600 тыс. *квт*							$N_г$=700 тыс. *квт*						
8	9	10	11	12	13	14	8	9	10	11	12	13	14
394	450,3	280,0	574,0	50,2	507,7	229,8	591	675,4	83,0	—	—	460,6	83,0
224	256,0	796,0	251,7	220,3	507,7	805,5	361	412,6	659,0	48,0	42,0	460,6	700,0
272	155,4	972,0	352,3	616,6	507,7	1160,9	435	248,6	809,0	212,0	371,0	460,6	1138,0
321	183,4	670,0	324,3	567,6	507,7	1263,3	509	290,9	482,0	169,7	297,0	460,6	1323,0
353	403,4	228,0	104,3	91,3	507,7	1400,0	504	576,0	77,0	—	—	460,0	1400,0
467	533,7	—138,0	—	—	507,7	1262,0	668	763,4	—339,0	—	—	460,6	1061,0
576	—	—341,0	—	—	—	921,0	804	—	—569,0	—	—	—	492,0
324	—	—119,0	—	—	—	802,0	497	—	—292,0	—	—	—	200,0
550	—	—374,0	—	—	—	428,0	750	—	—574,0	—	—	—	—374,0
603	—	—450,0	—	—	—	—22,0	817	—	—664,0	—	—	—	—1038,0
484	—	—338,0	—	—	—	—360,0	660	—	—514,0	—	—	—	—1552,0
482	—	—271,0	—	—	—	—631,0	696	—	—485,0	—	—	—	—2037,0
5050		+2946 —2031 —1400 1546		1546,0	Дефицит	631,0	7292		+2110 —3437 —1400 710		710,0	Дефицит 2037,0	

Таблица 10б

Периоды	Месяцы	Бытовой сток реки, млн $м^3$	Потребность среднего гектара, $м^3/га$	$N_г=0$			$N_г=200$ *мгвт* $Q_г=520$ млн. $м^3/мес$						
				возможное потребление орошения, млн $м^3$	общая потребность орошения, млн $м^3$	необходимая емкость водохранилища, $м^3$	потребность ГЭС, млн $м^3$	можно оросить этой водой, тыс. *га*	избытки воды возможные к использованию для орошения, млн $м^3$	дополнительно можно оросить, тыс. *га*	для этого нужно воды, млн $м^3$	всего будет орошено тыс., *га*	необходимая емкость водохранилища, млн $м^3$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
				Год 97% обеспеченности									
Вегетационный	IV	503	875	503	558,4	784,6	10,4	11,9	492,6	586,5	513,2	598,4	541,4
	V	766	875	766	558,4	992,2	—	—	766,0	598,4	523,6	598,4	783,8
	VI	933	1750	933	1116,7	808,5	—	—	933,0	598,4	1047,3	598,4	669,5
	VII	745	1750	745	1116,7	436,8	2.7	1,5	742,3	596,9	1044,6	598,4	367,2
	VIII	434	875	434	558,4	312,4	5,4	6,2	428,6	5922	518,2	598,4	277,6
	IX	246	875	246	558,4	0	25,9	29,6	220,1	568,8	497,7	598,4	0
Невегетационный	X	177	—	177	—	177,0	67,0	—	110,0	—	—	—	110,0
	XI	153	—	153	—	330,0	7,8	—	145,2	—	—	—	255,2
	XII	131	—	131	—	461,0	80,4	—	50,6	—	—	—	305,8
	I	112	—	112	—	573,0	67,0	—	45,0	—	—	—	350,8
	II	109	—	109	—	682,0	29,0	—	80,0	—	—	—	430,0
	III	158	—	158	—	840,0	26,8	—	131,2	—	—	—	562,0
	Год	3627 840	7000	4467	4467		322,4		3582,6 562,0		4144,6		
		4467	638,2 т. *га*						4144,6				

Продолжение таблицы 10 б

$N_г$=400 *мвт*			$Q_г$=1040 млн *м³/мес*				$N_г$=500 *мвт.* $Q_г$=1560 млн *м³/мес*						
8	9	10	11	12	13	14	8	9	10	11	12	13	14
132,2	151,1	370,8	297,4	260,2	448,5	110,6	259,2	296,2	243,8	45,9	40,2	342,1	203,6
26,8	30,6	739,2	417,9	365,8	448,5	484,0	101,8	116,3	664,2	225,8	197,6	342,1	670,2
51,8	29,6	881,2	418,9	733,2	448,5	632,0	142,6	81,5	790,4	260,6	456,1	342,1	1004,8
77,7	44,4	667,3	404,1	707,3	448,5	592,0	166,1	94,9	578,9	247,2	432,6	342,1	1151,1
101,8	116,3	332,2	332,2	290,7	448,5	633,5	211,6	241,8	222,4	100,3	87,8	342,1	1285,7
194,4	222,2	51,6	226,3	198,1	448,5	487,0	311,0	,355,4	—65,0	—	—	342,1	1220,7
267,8	—	—90,8	—	—	—	396,2	391,0	—	—214,0	—	—	—	1006,7
129,6	—	23,4	—	—	—	419,6	207,4	—	—54,4	—	—	—	952,3
241,1	—	—110,1	—	—	—	309,5	375,0	—	—244,0	—	—	—	708,3
281,2	—	—169,2	—	—	—	140,3	423,2	—	—311,2	—	—	—	397,1
198,4	—	—89,4	—	—	—	50,9	326,6	—	—217,6	—	—	—	179,5
208,9	—	—50,9	—	—	—	0	337,5	—	—179,5	—	—	—	0
1911,7		3042,2 —487,0 2555,3		2555,3			325,3		2500 —1285,7 1214,3		1214,3		

$N_г$=600 *мгвт*							$N_г$=700 *мгвт*						
8	9	10	11	12	13	14	8	9	10	11	12	13	14
394	450,3	109,0	—	—	282	109,0	591	675,4	—88	0	0	248,6	—88
224	256,0	542,0	26,0	22,8	282	628,2	361	412,6	405	0	0	248,6	405
272	155,4	661,0	126,6	221,6	282	1067,6	435	248,6	498	0	0	248,6	903
321	183,4	424,0	98,6	172,6	282	1319,0	509	290,9	236	0	0	248,6	1139
353	403,4	81,0	—	—	282	1400,0	504	576,0	—70	0	0	248,6	1069
467	533,7	—221,0	—	—	282	1179,0	668	763,4	—422	0	0	248,6	647
576	—	—399,0	—	—	—	780,0	804	—	—627	—	—	—	20
324	—	—171,0	—	—	—	609,0	497	—	—344	—	—	—	—324
550	—	—419,0	—	—	—	190,0	750	—	—619	—	—	—	—943
603	—	—491,0	—	—	—	—301,0	817	—	—705	—	—	—	—1648
484	—	—375,0	—	—	—	—676,0	660	—	—551	—	—	—	—2199
482	—	—324,0	—	—	—	—1000,0	696	—	—538	—	—	—	—2737
5050		+1817,0 —2400,0 —1400,0 417,0		417	Дефицит	1000,0	7292		+1139 —3964			Дефицит	—2825

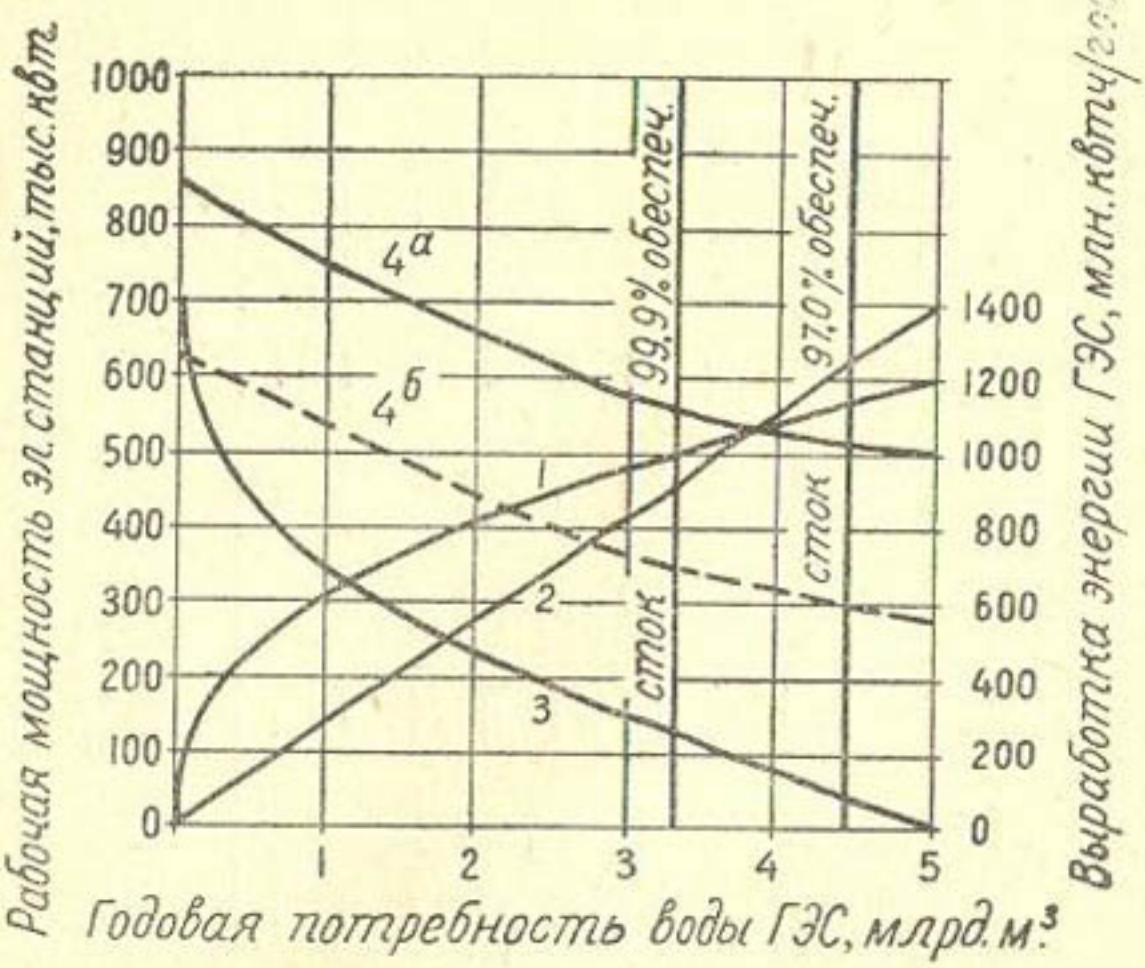


Рис. 30. Зависимости рабочей мощности *1* и выработки энергии *2* проектируемой ГЭС, мощности заменяющей КЭС *3* и площади орошения *4* от годовой потребности ГЭС для покрытия заданного графика нагрузки (для схемы II)

Эффективность ГЭС (при всех прочих условиях, соответствующих схеме I) в этом случае повышается.

Если в качестве примера выбора параметров ГЭС при комплексном ирригационно-энергетическом использовании водного источника по схеме II (рис. 29) рассматривать энергетическую систему (ее структуру, график нагрузки), реку, водохранилище и ГЭС из примера схемы I, то различие в расчетах начнется с подсчетов оросительной способности реки для принятых значений мощности ГЭС (сравните табл. 9 и 10).

Графические зависимости рабочей мощности ГЭС (1), заменяющей ее мощности КЭС (3) и орошаемой площади в году 75 — 97% обеспеченности (табл. 10а и 10б) от величины годовой потребности воды ГЭС для покрытия заданной ей части графика нагрузки энергосистемы приведены на рис. 30.

Зависимости оросительной способности реки при комплексном использовании водных и водноэнергетических ресурсов по схеме II, построенные для лет, сильно различающихся по водности, иногда нарушают свою параллельность в связи с появлением сбросов воды в отдельные периоды. Это в свою очередь приводит к нескольким зависимостям дополнительных среднегодовых расчетных затрат в сельское хозяйство на ком-

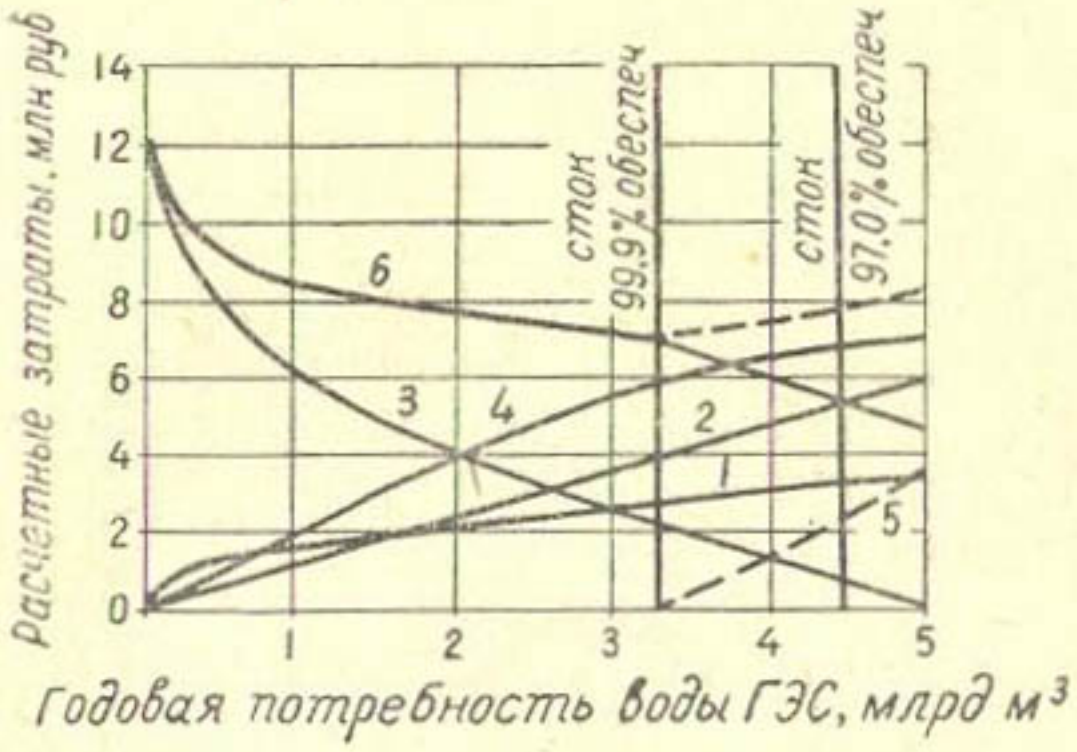


Рис. 31. Зависимости среднегодовых расчетных затрат в ГЭС *1*, сэкономленное топливо *2*, заменяющую КЭС *3*, дополнительных затрат в сельское хозяйство *4*, компенсацию дефицита электроэнергии в системе *5* и их суммы *6* от годовой потребности воды ГЭС (для схемы II)

пенсацию снижения величины орошаемых площадей на рассматриваемом массиве. При этом для выбора наивыгоднейшей величины рабочей мощности ГЭС должна быть принята зависимость, наиболее близко соответствующая году расчетной обеспеченности орошения.

Выражая полученные зависимости, как и в предыдущем примере (§ 4), в среднегодовых расчетных затратах (рис. 31) и суммируя их, найдем, что, если не учитывать затраты (ущерб) на компенсацию недовырабатываемой энергии ГЭС, то зависимость суммарных среднегодовых расчетных затрат в рассматриваемом диапазоне изменения рабочей мощности ГЭС 0-700 тыс. *квт* в данном примере не имеет минимума и величина годовой потребности воды ГЭС выходит далеко за пределы объема годового стока реки 100% обеспеченности. Однако наивыгоднейшее распределение водных ресурсов реки и соответствующие этому распределению параметры компонентов ирригационно-энергетического комплекса должны определяться из условия достижения минимума суммарных среднегодовых расчетных затрат не только на производство заданной продукции, но и на компенсацию возможной ее недовыработки в критически маловодные (перебойные) годы. Вложения на компенсацию возможного дефицита электроэнергии могут быть определены как $з^{э}_{д}\,\overline{Э}_{д}$, где $з^{э}_{д}$—среднегодовые

расчетные затраты на компенсацию 1 *квт·ч* дефицита электроэнергии, зависящие от способа компенсации; $\overline{Э}_д$ — среднемноголетний дефицит электроэнергии в энергосистеме при заданной мощности проектируемой ГЭС. Дефицит электроэнергии для принятой величины рабочей мощности ГЭС в рассматриваемом году с некоторой степенью приближения может быть определен по дефициту воды на ГЭС, подсчитанному в табл. 10. Определив таким образом величины дефицита энергии для нескольких лет, различных по водности (99,9; 97; 75% обеспеченности), построим зависимость дефицита в энергосистеме от обеспеченности годового стока реки (рис. 32). Величина среднемноголетнего дефицита энергии $\overline{Э}_д$, соответствующая принятой мощности ГЭС и равная отношению суммы дефицитов энергии за перебойные годы к числу лет всего ряда, определится как 0,01 от площади соответствующего криволинейного треугольника *oab* (рис. 32):

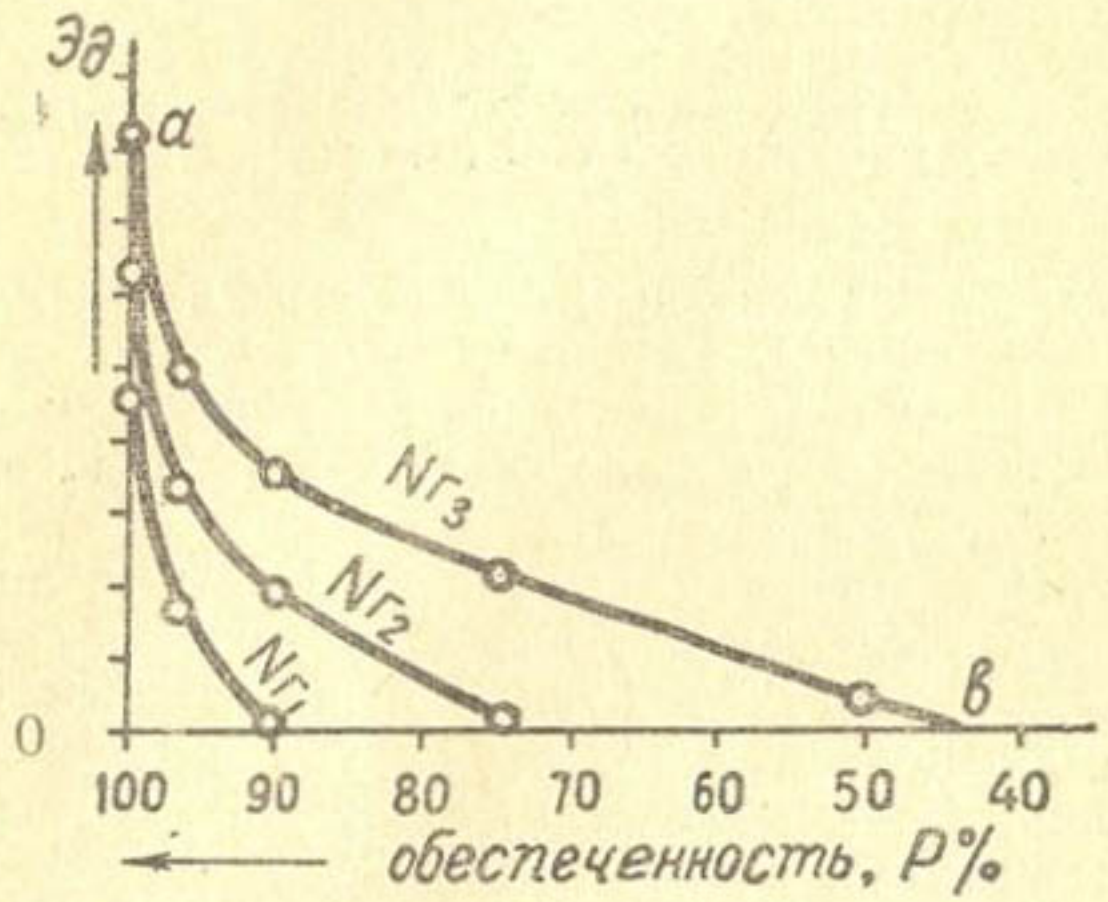


Рис. 32. Зависимости величины годового дефицита энергии в системе $Э_д$ от обеспеченности годового стока p при трех значениях мощности проектируемой ГЭС.

Площадь треугольника должна подсчитываться с учетом принятых на чертеже масштабов и размерности. Используя данные рис. 32, можно построить примерную зависимость среднемноголетнего дефицита энергии в системе $\overline{Э}_д$ и среднегодовых расчетных затрат на компенсацию дефицита энергии ГЭС $з^э_д \overline{Э}_д$ от величины рабочей мощности ГЭС $N_г$ (величины го-

довой потребности воды ГЭС). Суммируя зависимость среднегодовых расчетных затрат на компенсацию дефицита энергии ГЭС со всеми другими зависимостями (пунктирные построения на рис. 31), получим уточненную зависимость суммарных среднегодовых затрат по ирригационно-энергетическому комплексу от потребления воды ГЭС. Минимум этой зависимости укажет наивыгоднейшее распределение воды между компонентами комплекса и соответствующие ему параметры.

В рассматриваемом нами примере при мощности ГЭС $N_г = 500, 600, 700$ тыс. *квт* средний многолетний дефицит воды получается соответственно равным 12,5; 265 и 1750 млн $м^3$, средний многолетний дефицит энергии $Э_д$ —3,6; 73,4; 477 млн *квт·ч*. Принимая затем среднегодовые затраты на компенсацию 1 *квт·ч* дефицита электроэнергии з $_д$—0,05 *руб/квт·ч* получим величину среднегодовых расчетных затрат на компенсацию дефицита, соответственно равную 0,18; 3,67 и 24,7 млн *руб.*, а зависимость их от величины годового попуска воды ГЭС изобразится на рис. 31 кривой 5. Суммируя эти затраты со всеми другими по комплексу, найдем (рис. 31), что минимум суммарных затрат будет соответствовать рабочей мощности ГЭС $N_г \sim 490$ тыс. *квт* с годовой потребностью воды не более стока в году 99,9% обеспеченности.

Расчетная кривая обеспеченности орошаемых площадей на массиве будет характеризоваться при этом рис. 33.

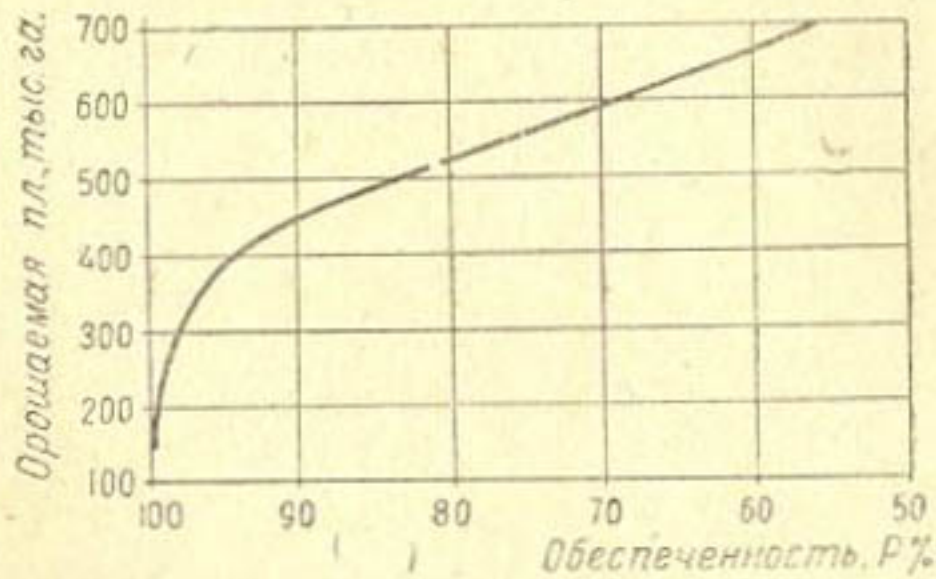


Рис. 33. Зависимость величины орошаемой площади от обеспеченности годового стока реки при оптимальной мощности проектируемой ГЭС (490 тыс. *квт*).

В обоих рассмотренных выше примерах выбора рабочей мощности ГЭС мы условно исходили из соображения, что в энергосистеме используется только требуемая в годовом графике нагрузки энергия проектируемой ГЭС. Однако при ирригационно-энергетическом использовании реки в течение веге-

тационного периода года, как правило, имеются возможности дополнительной (сезонной) выработки гидроэнергии, сверх необходимой в графике нагрузки энергосистемы. Правда, такое увеличение выработки энергии ГЭС в период повышенных (вегетационных) расходов не всегда может быть реализовано в энергосистеме и ограничивается режимом работы тепловых электростанций и энергопотребления. Поэтому возможная средняя многолетняя выработка энергии ГЭС, используемая в энергосистеме, должна определяться с учетом всех этих факторов.

Возможности использования дополнительной сезонной выработки энергии ГЭС должны быть обязательно учтены при выборе оптимального значения ее рабочей мощности, так как это повышает экономическую эффективность ГЭС и комплекса в целом. Однако повышение экономической эффективности ГЭС в энергосистеме при этом может не только не повысить целесообразного значения ее рабочей мощности, как это имеет место при работе ГЭС вне комплексов, но даже понизить его. Объясняется это тем, что при комплексном ирригационно-энергетическом использовании реки и наличии в энергосистеме возможностей потребления сезонной энергии ГЭС может оказаться целесообразным направить бо́льшую часть воды только для выработки этой сезонной энергии без предъявления каких-либо ограничений сельскому хозяйству.

Покажем это на нашем числовом примере, предполагая при этом, что в энергосистеме может быть использована вся возможная выработка энергии проектируемой ГЭС.

Затруднением при определении возможной среднемноголетней выработки ГЭС является зависимость ее от величины принятой площади орошения сельхозугодий, которая определяется оптимальным значением искомой нами величины рабочей мощности ГЭС. Такая круговая взаимозависимость определяемых величин — рабочей мощности, выработки энергии и площади орошения — заставляет искать упрощенные и поэтому менее точные пути их определения.

Оптимальное значение площади орошения определяется в конечном итоге из зависимости (подобной изображенной на рис. 28, 33) оросительной способности реки при оптимальном значении рабочей мощности ГЭС от обеспеченности годового стока реки путем установления оптимального значения расчетной обеспеченности орошения. Выбор расчетной величины обеспеченности орошения может быть сделан методом, описанным в главе II. Предположим, что для нашего случая оптимальное значение обеспеченности орошения равно 75%. Потребность воды ГЭС и орошения в году 75% обеспеченно-

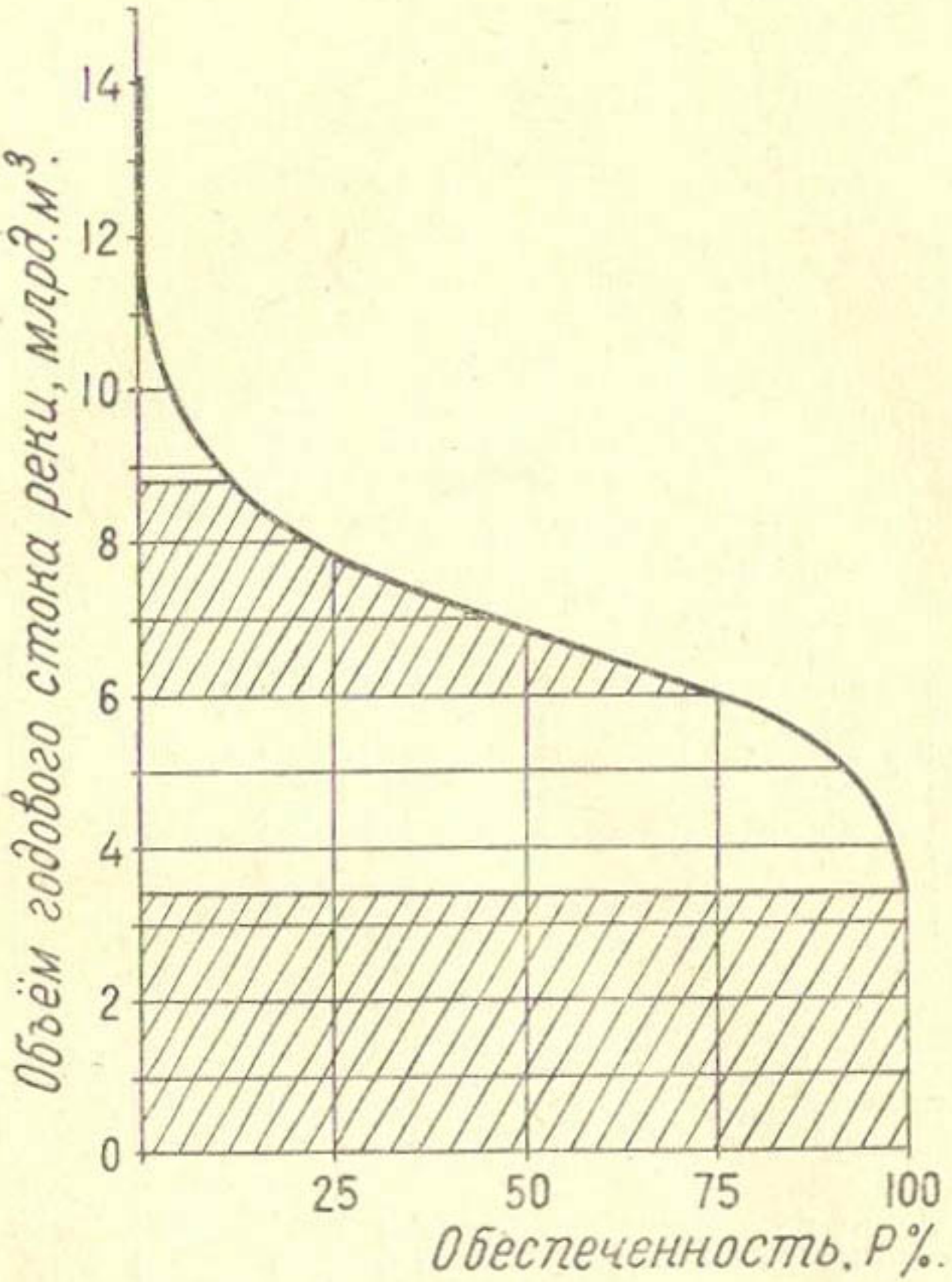


Рис. 34. Кривая обеспеченности годовых объемов стока реки в створе проектируемого комплексного гидроузла. $C_V = 0{,}22$; $\overline{V}_{год} = 7{,}0$ млрд $м^3$.

сти составляет 5965 млн $м^3$ (см. табл. 10а) при всех значениях мощности ГЭС. Потребность воды ГЭС на выработку энергии при величине ее установленной мощности 200 тыс. *квт* (учитывая, что пропускная способность $Q_г = 520$ млн $м^3/мес$) в этом году будет 3398 млн $м^3$ (см. графы 8 и 12). Максимально же возможная пропускная способность ГЭС равна $520 \times 12 = 6240$ млн $м^3/год$, и, следовательно, в многоводные годы ГЭС сможет дополнительно использовать $6240 - 3398 = 2842$ млн $м^3$ воды. Общая потребность воды ГЭС и орошения в многоводные годы составит при этом $5965 + 2842 = 8807$ млн $м^3$. Про-

ведя три горизонтальные прямые (рис. 34) до пересечения с кривой обеспеченности годовых объемов стока реки, соответствующие общему потреблению воды в многоводные годы (8807 млн $м^3$), в расчетном для орошения году (5965 млн $м^3$) и потребности ГЭС в этом году (3398 млн $м^3$), получим две зоны (заштрихованные на чертеже), суммарная площадь которых равна потреблению воды ГЭС за многолетие. Средний многолетний используемый ГЭС сток будет равен при этом 0,01 этой площади. В нашем случае для мощности ГЭС 200 *мгвт* площадь равна 452 млрд% $м^3$. Средний многолетний объем используемого ГЭС стока будет равен 4,52 млрд $м^3$. Средняя многолетняя выработка энергии (при среднем напоре $H=125$ *м*) $\overline{Э}_г=1{,}255$ млрд *квт. ч.*

Повторив подобные рассуждения для мощности ГЭС

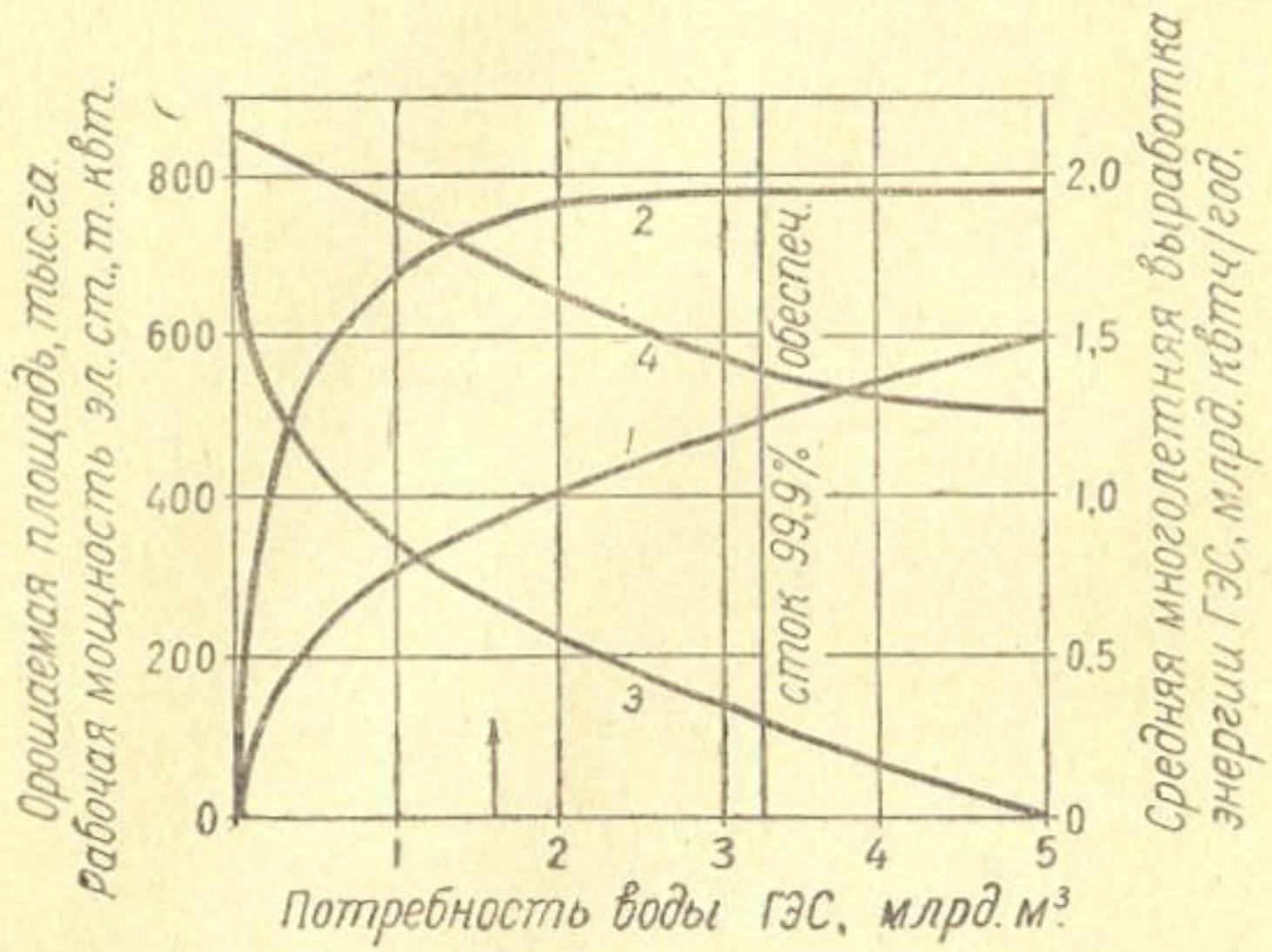


Рис. 35. Зависимости рабочей мощности проектируемой ГЭС *1*, ее средней многолетней выработки энергии *2*, мощности заменяющей КЭС *3* и площади орошения *4* от годовой потребности воды ГЭС для покрытия гарантируемой зоны графика нагрузки энергосистемы (схема II-а).

400 тыс. *квт*, найдем, что средняя многолетняя выработка энергии составит 1,89 млрд *квт·ч*. При помощи ГЭС 500 тыс. *квт* и более она будет равна 1,95 млрд *квт·ч*. Зависимость средней многолетней выработки энергии ГЭС от ее мощности — годовой потребности воды, необходимой для покрытия гаран-

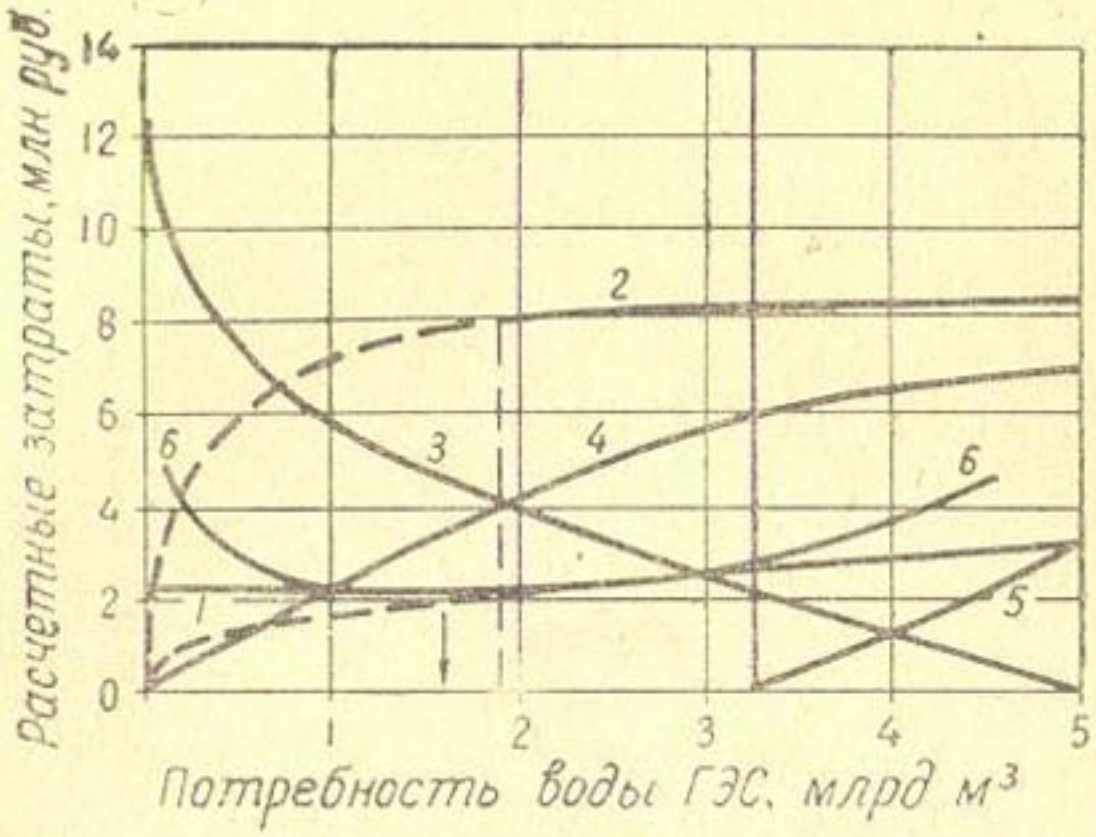


Рис. 36. Среднегодовые расчетные затраты в ГЭС *1*, сэкономленное топливо *2*, в заменяющую КЭС *3*, дополнительные затраты в сельское хозяйство *4*, компенсацию дефицита электроэнергии в системе *5* и сумма *6* в зависимости от годовой потребности воды ГЭС для покрытия гарантируемой зоны графика нагрузки энергосистемы (схема II-а).

тируемой зоны графика нагрузки энергосистемы при этой мощности — изобразится на рис. 35 кривой 2. Остальные зависимости рис. 35 окажутся теми же, что и на рис. 30.

Наличие возможностей использования в энергосистеме сезонной выработки энергии ГЭС очень часто [18] приводит к экономической целесообразности установки на ней дополнительной дублируемой тепловыми станциями мощности. Эта мощность ГЭС не ущемляет интересов орошения, и ее установка оправдывается исключительно экономией топлива на ТЭС. Наивыгоднейшая величина такой мощности определяется равенством дополнительных затрат на ГЭС $з^{г}_{N}$ и соответствующей экономией на ТЭС $\alpha_э sb\bar{h}_г$ или, что то же самое, экономически оправдываемым числом часов использования дополнительного киловатта дублируемой мощности ГЭС

$$\bar{h}_г = h_{г.эк} = \frac{з^{г}_{N}}{\alpha_э sb}. \qquad (42)$$

Число часов использования каждого дополнительного киловатта дублируемой мощности ГЭС может быть найдено из той же зависимости средней многолетней выработки (2, рис. 35)

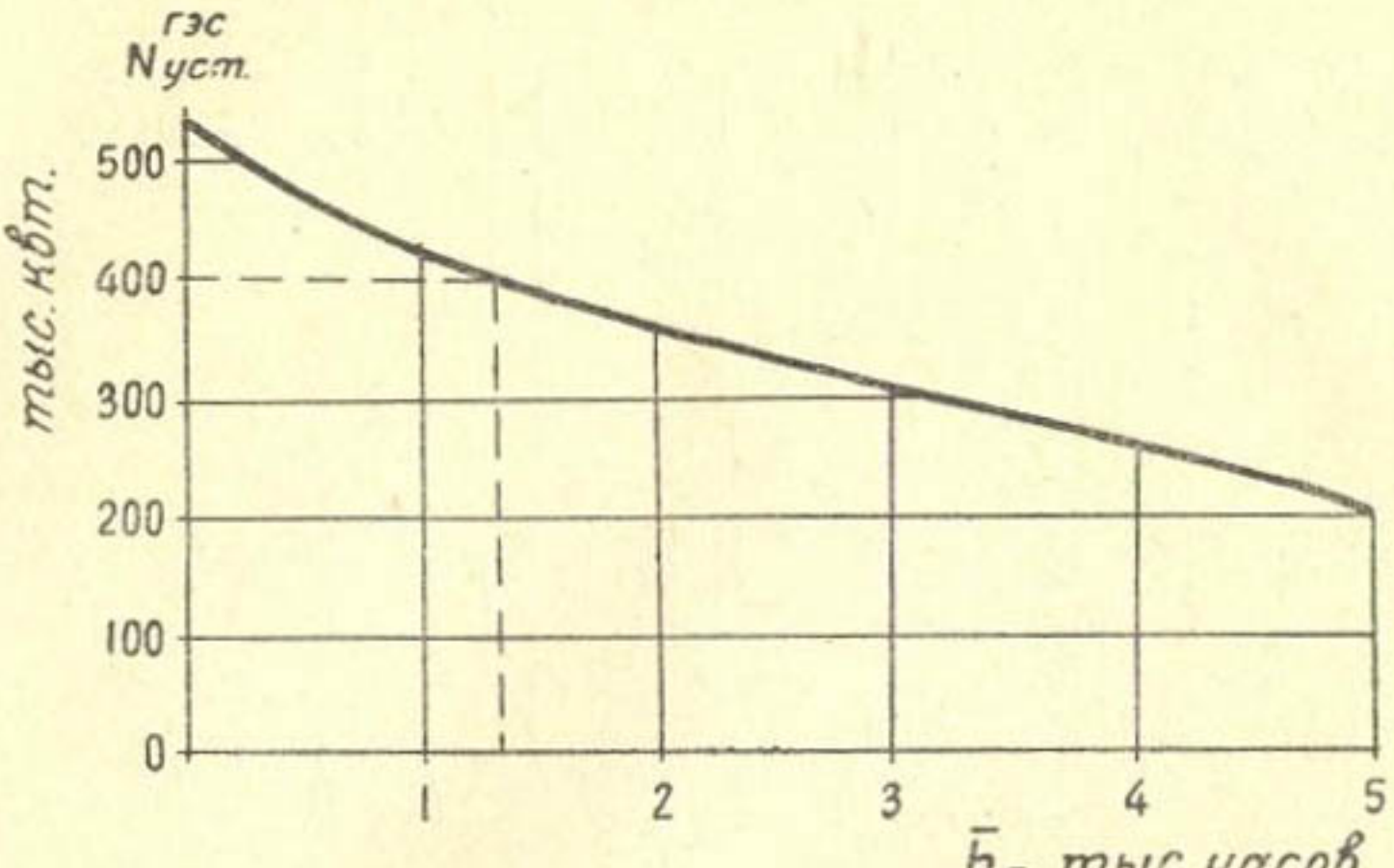


Рис. 37. Зависимость среднего многолетнего числа часов использования дополнительного киловатта $\bar{h}_г$ от установленной мощности ГЭС $N_г^у$

$\bar{h}_г = \frac{\Delta \bar{Э}_г}{\Delta N_г}$. Зависимость его от мощности ГЭС для нашего примера изображена на рис. 37, а

$$h_{г.эк} = \frac{5{,}6}{1{,}06 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}4} = 1320 \text{ ч.}$$

Равенство $\bar{h}_г$ и $h_{г.эк}$ соответствует (см. рис. 37) мощности ГЭС $N^г_{топл.} = 400$ тыс. *квт*. Эта мощность, оправдываемая только экономией топлива на тепловых электростанциях системы, должна быть установлена на ГЭС даже в том случае, если целесообразная ее рабочая мощность окажется меньшей. Отсюда дополнительные затраты на ГЭС для установки на ней рабочей мощности потребуются только при ее величине большей $N^г_{топл.}$ (кривая 1 на рис. 36), а экономия на топливе (кривая 2) в пределах рабочей мощности $O \div N^г_{топл.}$ останется постоянной. Суммируя теперь (как и в предыдущих примерах) затраты в ГЭС, КЭС, орошение (кривые 1, 3, 4, 5) и вычитая получаемую при этом экономию на топливе (кривая 2, рис. 36)*, найдем, что минимум суммарных среднегодовых расчет-

* Путем выделения (на рис. 35) из средней многолетней выработки энергии ГЭС доли ее, вырабатываемой по пиковому графику в течение невегетационного периода года, на рис. 36 может быть учтено и различие в стоимости вытесняемого в этот период топлива.

ных затрат по ирригационно-энергетическому комплексу достигается при величине рабочей мощности ГЭС $N^{г}_{р}$ = 380 тыс. *квт*.

Из сравнения с результатами предыдущего примера видно, что наличие сезонной выработки энергии ГЭС в данном случае понизило оптимальное значение рабочей мощности ГЭС на 120 тыс. *квт*.

§ 6. Выбор мощности и производительности компонентов комплекса в случае забора воды на орошение из обоих бьефов ГЭС

(III схема)

Подобная схема комплексного ирригационо-энергетического использования водных ресурсов реки (рис. 38) в отдельных случаях расчетов легко сводится к одной из рассмотренных выше. Действительно, если экономические показатели орошения из нижнего бьефа ГЭС равны или меньше таковых из верхнего бьефа, то в первую очередь следует рассмотреть орошение только из нижнего бьефа, так как это улучшит энергетические показатели ГЭС, не ухудшая экономики орошения. Выбирая параметры ГЭС и орошения по схеме II, найдем

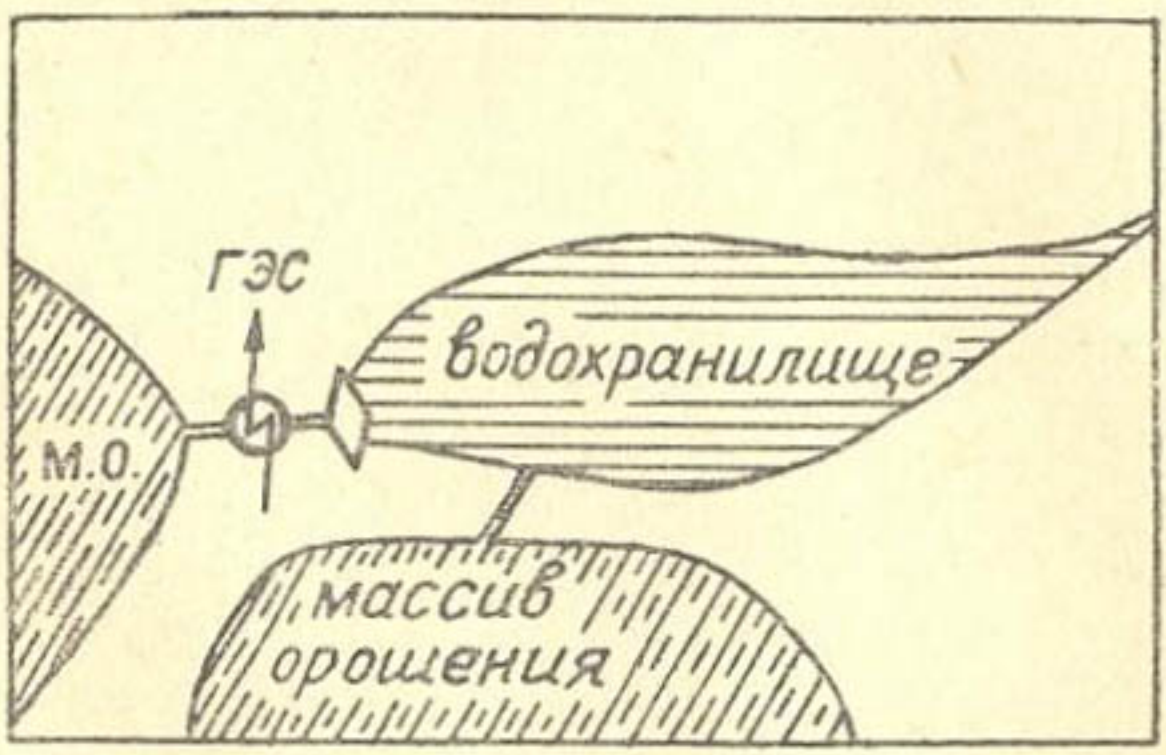


Рис. 38. Третья расчетная схема использования ресурсов реки.

наивыгоднейшую мощность ГЭС и площадь массива орошения. Если при этом окажется, что расчетная наивыгоднейшая величина площади орошения в нижнем бьефе ГЭС больше фактически там имеющейся, то следует параметры ГЭС пересчитать по расчетной схеме I, учитывая обязательный попуск

воды в нижний бьеф ГЭС для орошения фактически имеющегося в нижнем бьефе массива.

В случае, если освоение площадей в верхнем бьефе ГЭС дешевле, чем в нижнем, к вопросу выбора наивыгоднейшей мощности ГЭС можно подойти следующим образом. Так же, как и в предыдущих случаях (схема I и II), подсчитываются потребности воды для нескольких значений рабочей мощности ГЭС в каждом месяце (графа 3 табл. 11). Затем для принятых значений мощности ГЭС определяются возможности орошения в верхнем и нижнем бьефах исходя из соображений максимального удовлетворения потребностей более экономичного орошения площадей в верхнем бьефе. Полученные зависимости рабочей мощности ГЭС, заменяющей ее КЭС, орошаемой площади из верхнего и нижнего бьефов от величины годового потребления воды ГЭС строятся на одном графике (рис. 39). Как и в предыдущих случаях, указанные зависимо-

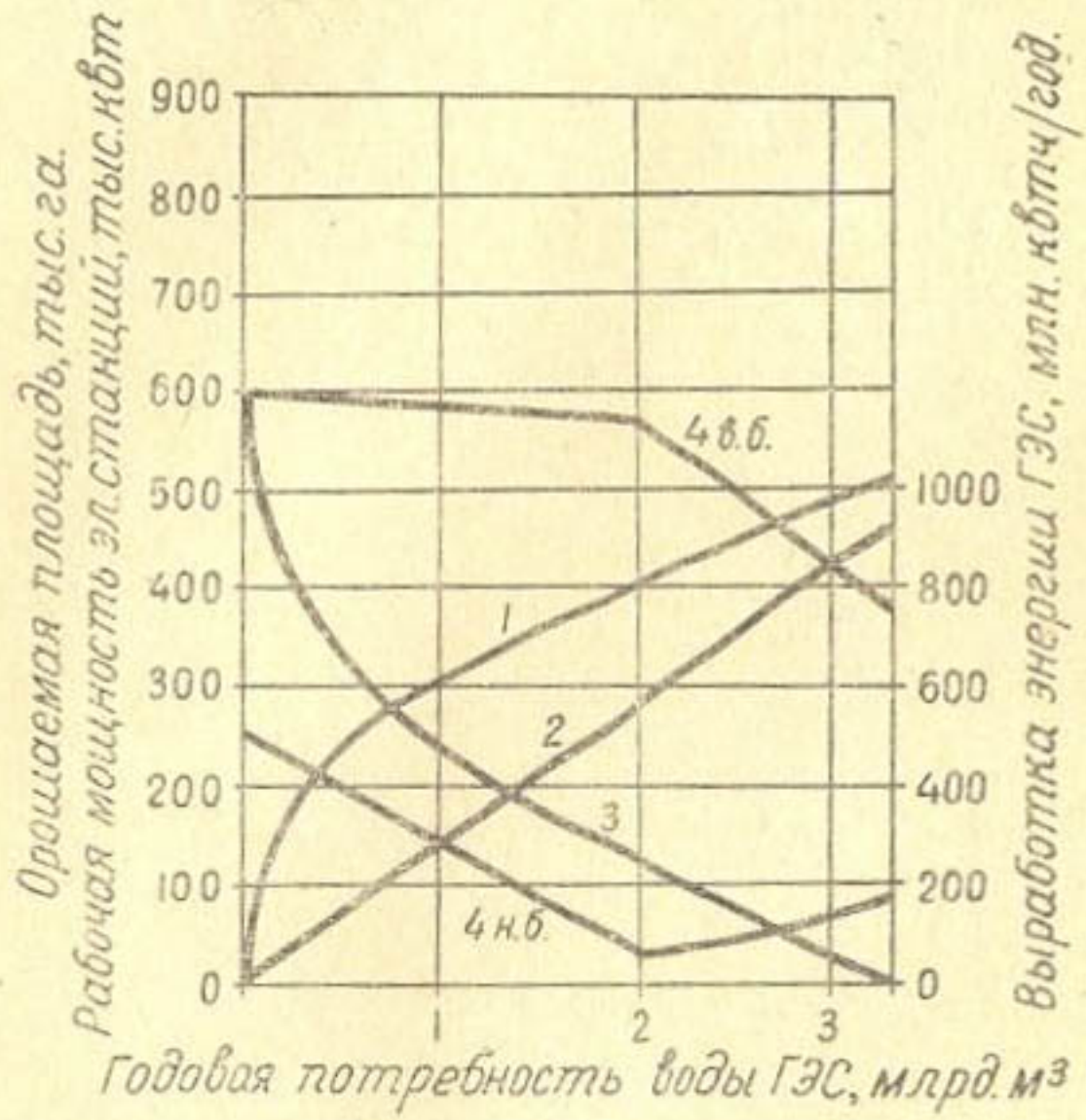


Рис. 39. Зависимости рабочей мощности *1* и выработки энергии *2* проектируемой ГЭС, мощности заменяющей КЭС *3*, площади орошения в верхнем (*4* в. б.) и нижнем (*4* н. б.) бьефах от годовой потребности воды ГЭС (схема III)

сти следует выразить в среднегодовых расчетных затратах (рис. 40) и просуммировать. Минимум суммы народнохозяй-

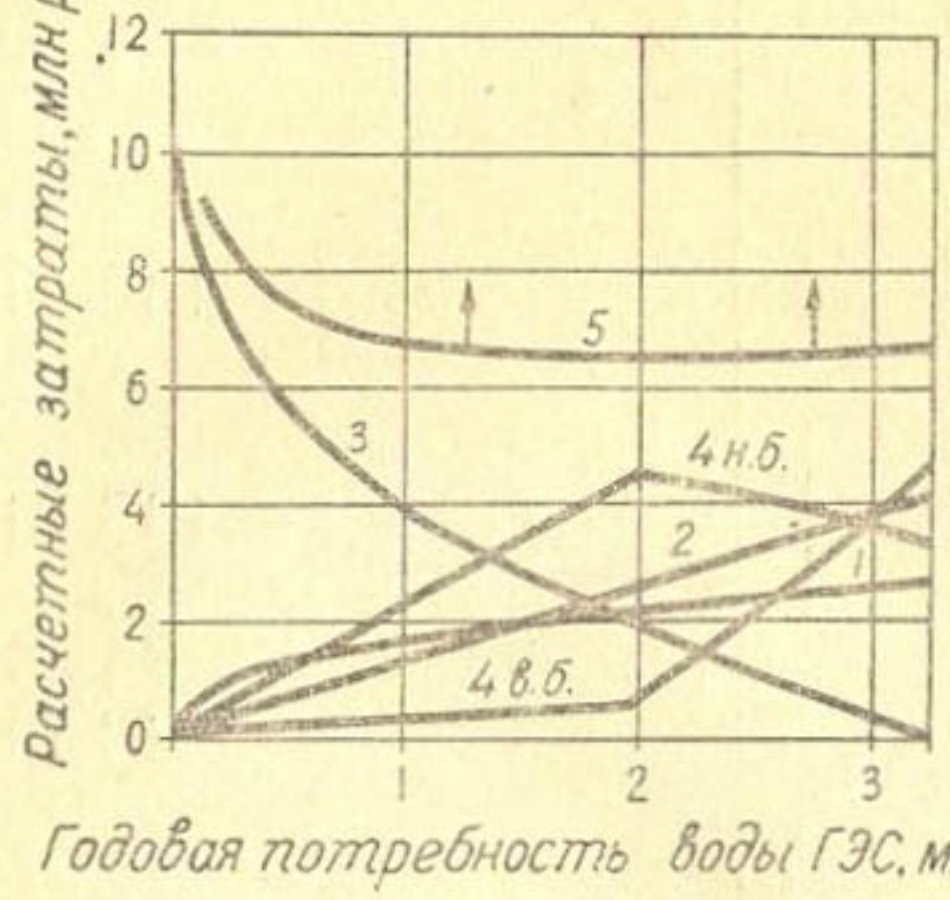


Рис. 40. Среднегодовые расчетные затраты в ГЭС *1*, сэкономленное топливо *2*, заменяющую КЭС *3*, дополнительные затраты в сельское хозяйство (*4* н. б. — от снижения площади орошения в нижнем и 4 в. б. — верхнем бьефе ГЭС) и их сумма *5* в зависимости от годовой потребности воды ГЭС для покрытия заданного графика нагрузки (схема III).

ственных затрат на производство заданного количества электроэнергии и сельскохозяйственной продукции покажет наивыгоднейшие параметры ГЭС, КЭС и орошения в верхнем и нижнем бьефах.

В качестве примера в табл. 11 и на рис. 39 и 40 подсчитаны наивыгоднейшие значения мощности ГЭС, КЭС и площадей орошения для условий энергосистемы, реки, водохранилища и ГЭС, взятых из примера § 4. Максимальная возможная площадь орошения в верхнем бьефе ГЭС принималась равной 600 тыс. *га*. Дополнительные среднегодовые расчетные затраты от перехода на заменяющее орошение и отказа от орошения из верхнего бьефа ГЭС принимались условно равными 22 *руб/га* и из нижнего бьефа — 20 *руб/га*. Наивыгоднейшая рабочая мощность ГЭС при этом получилась равной 350 — 450 тыс. *квт*, потребление воды ею 1,25 — 2,75 млрд $м^3$/*год*, что в 2,6 — 1,2 раза меньше годового стока реки 99,9% обеспеченности. Это говорит о том, что и в этом случае ГЭС весьма малоконкурентна в требованиях на воду по сравнению с орошением.

Таблица 11

Подсчет оросительной способности реки (III схема)

Месяцы	Бытовой сток реки, млн $м^3$	$N_г$=200 тыс. *квт*									
		потребность ГЭС, млн $м^3$	можно оросить водой ГЭС в нижнем бьефе, тыс. *га*	вода для орошения в верхнем бьефе, млн $м^3$	можно оросить в верхнем бьефе, тыс. *га*	для этого нужно воды, млн $м^3$	остаток воды, млн $м^3$	дополнительно можно оросить в нижнем бьефе, тыс. *га*	для этого нужно воды, млн $м^3$	всего будет орошено в нижнем бьефе, тыс. *га*	необходимая емкость водохранилища, млн $м^3$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		75% обеспеченности									
IV	674	10,4	11,9	663,6	600	525	138,6	200,5	175,4	212,4	811,2
V	1020	—	—	1020,0	600	525	495,0	212,4	185,9	212,4	1120,3
VI	1244	—	—	1244,0	600	1050	194,0	212,4	371,8	212,4	942,5
VII	991	2,7	1,5	988,3	600	1050	—61,7	210,9	369,1	212,4	511,7
VIII	581	5,4	6,2	575,6	600	525	50,6	206,2	180,4	212,4	381,9
IX	329	25,9	29,6	303,1	600	525	—221,9	182,8	160,0	212,4	0
X	235	67,0	—	168,0	—	—	168,0	—	—	—	168,0
XI	205	7,8	—	197,2	—	—	197,2	—	—	—	365,2
XII	176	80,4	—	95,6	—	—	95,6	—	—	—	460,8
I	153	67,0	—	86,0	—	—	86,0	—	—	—	546,8
II	146	29,0	—	117,0	—	—	117,0	—	—	—	663,8
III	211	26,0	—	184,2	—	—	184,2	—	—	—	848,0
	5965	322,4		4794,6			594,6		1442,6		
				848,0			848,0				
				5642,6			1442,6				

Продолжение таблицы 11

$N_г$=400 *мгвт*						$N_г$=500 *мгвт*					
3	4	5	6	7	12	3	4	5	6	7	12
132,2	151,1	541,8	579,0	506,6	35,2	259,2	296,2	414,8	378,4	339	75,8
26,8	30,6	993,2	579,0	506,7	251,7	101,8	116,3	918,2	378,4	339	655,0
51,8	29,6	1192,2	579,0	1013,3	700,6	142,6	81,5	1101,4	378,4	678	1078,4
77,7	44,4	913,3	579,0	1013,3	600,6	166,1	94,9	824,9	378,4	678	1225,3
101,8	116,3	479,2	579,0	506,7	573,1	211,6	241,8	369,4	378,4	339	1255,7
194,4	222,2	134,6	579,0	506,7	201,0	311,0	355,4	18,0	378,4	339	934,7
267,8	—	—32,8	—	—	168,2	391,0	—	—156,0	—	—	778,7
129,6	—	75,4	—	—	243,6	207,4	—	—2,4	—	—	776,3
241,1	—	—65,1	—	—	178,5	375,0	—	—199,0	—	—	577,3
281,2	—	—128,2	—	—	50,3	423,2	—	—270,2	—	—	307,1
198,4	—	—52,4	—	—	—2,1	326,6	—	—180,6	—	—	126,5
208,9	—	2,1	—	—	+2,1	337,5	—	—126,5	—	—	0
1911,7		4254,3 —201,0 4053,3		4053,3		3253,0		3646,7 —934,7 2712,0		2712	

§ 7. Выбор параметров комплекса в случае забора воды на орошение из бассейна перерегулирования, расположенного ниже ГЭС

(IV схема)

В случае комплексного ирригационно-энергетического использования водных ресурсов по схеме IV (рис. 41), кроме выбора наивыгоднейших параметров ГЭС и орошения, возникает дополнительная задача выбора экономически целесообразной емкости бассейна перерегулирования. Однако если рассматривать сооружение бассейна перерегулирования как мероприятие по компенсации снижения величины орошаемых площадей, то методика расчетов может быть сохранена прежней. Действительно, увеличение рабочей мощности ГЭС, требующее увеличения зимних попусков воды для энергетики, снижает величину площади возможного орошения. Если же сохранить эту воду в бассейне перерегулирования, то снижения величины орошаемых площадей можно избежать.

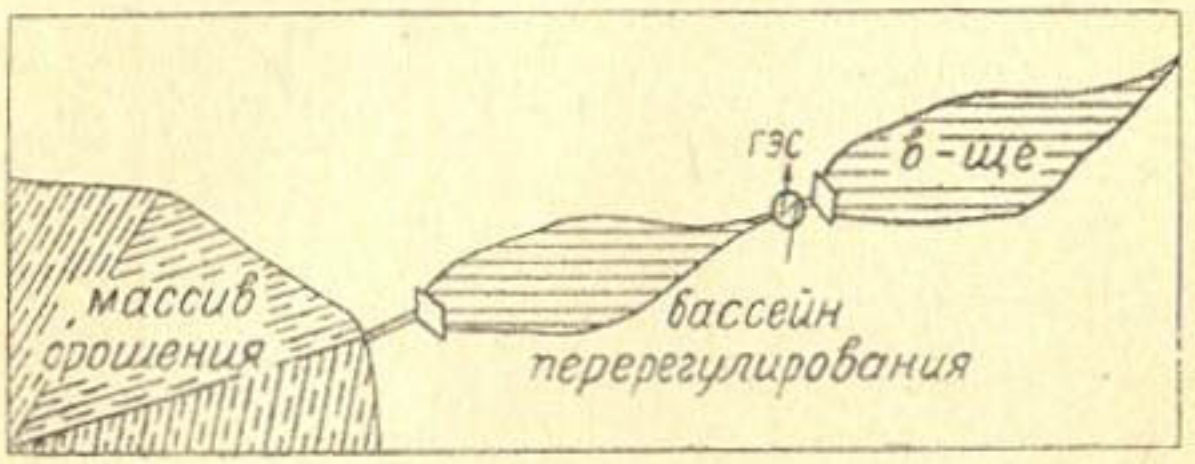


Рис. 41. Четвертая расчетная схема использования ресурсов реки.

Так, по данным примера 1 из § 5 (см. табл. 10).

При рабочей мощности ГЭС, тыс. *квт*	0	200	400	500	600
Снижение площади орошения составляет, тыс. *га*	0	40	190	295	350
Потребный попуск воды в течение невегетационного периода млн $м^3$	0	280	1330	2060	2450
Для его задержания и перерегулирования в целях ирригации потребуется полезная емкость млн $м^3$	0	280	1330	2060	2450

Получающиеся при этом зависимости рабочей мощности ГЭС, заменяющей ее мощности КЭС и необходимой емкости перерегулирования от величины годового потребления воды

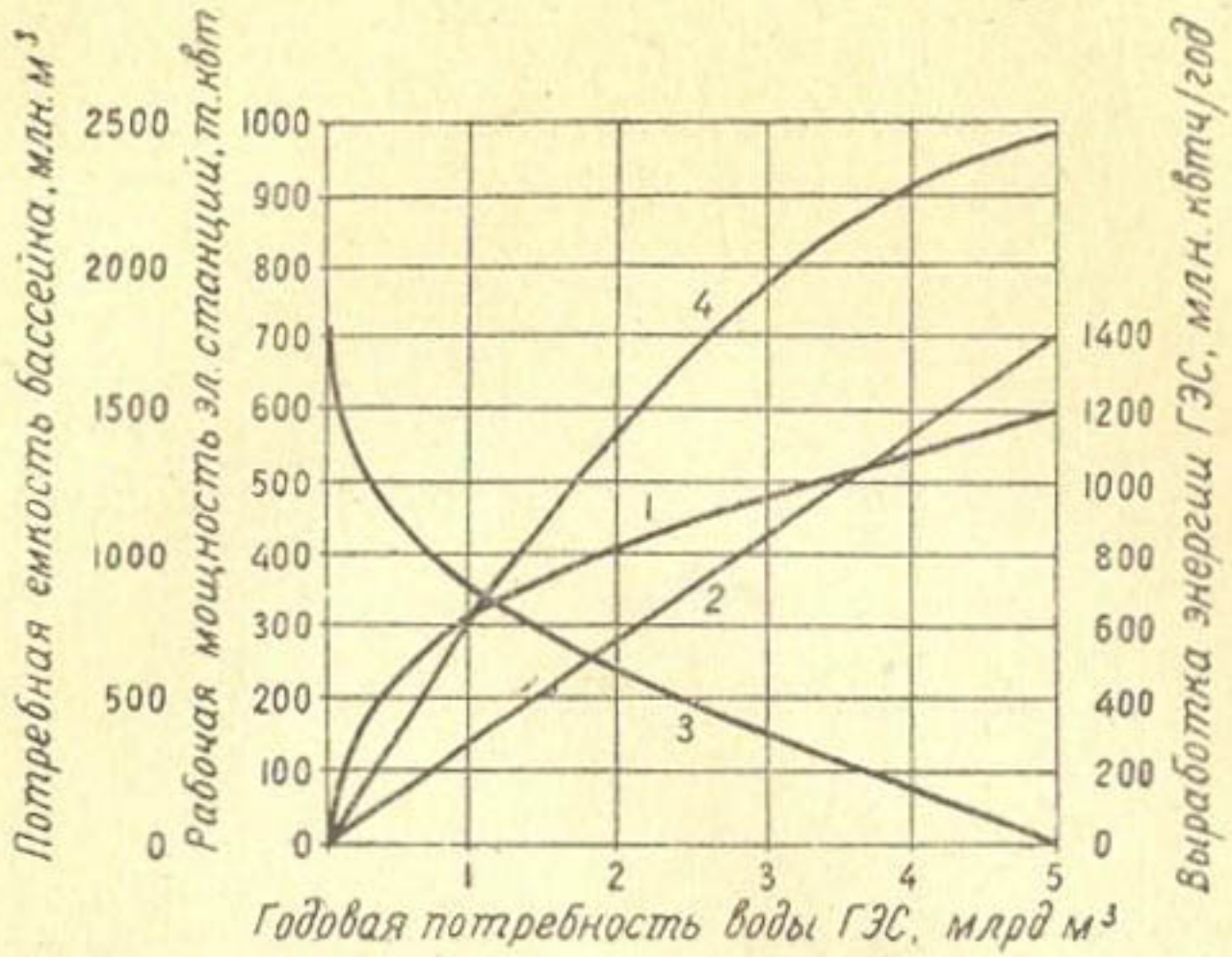


Рис. 42. Зависимости рабочей мощности 1 и выработки энергии *2* проектируемой ГЭС, мощности заменяющей КЭС *3* и необходимой емкости бассейна перерегулирования 4 от величины годовой потребности воды ГЭС (схема IV).

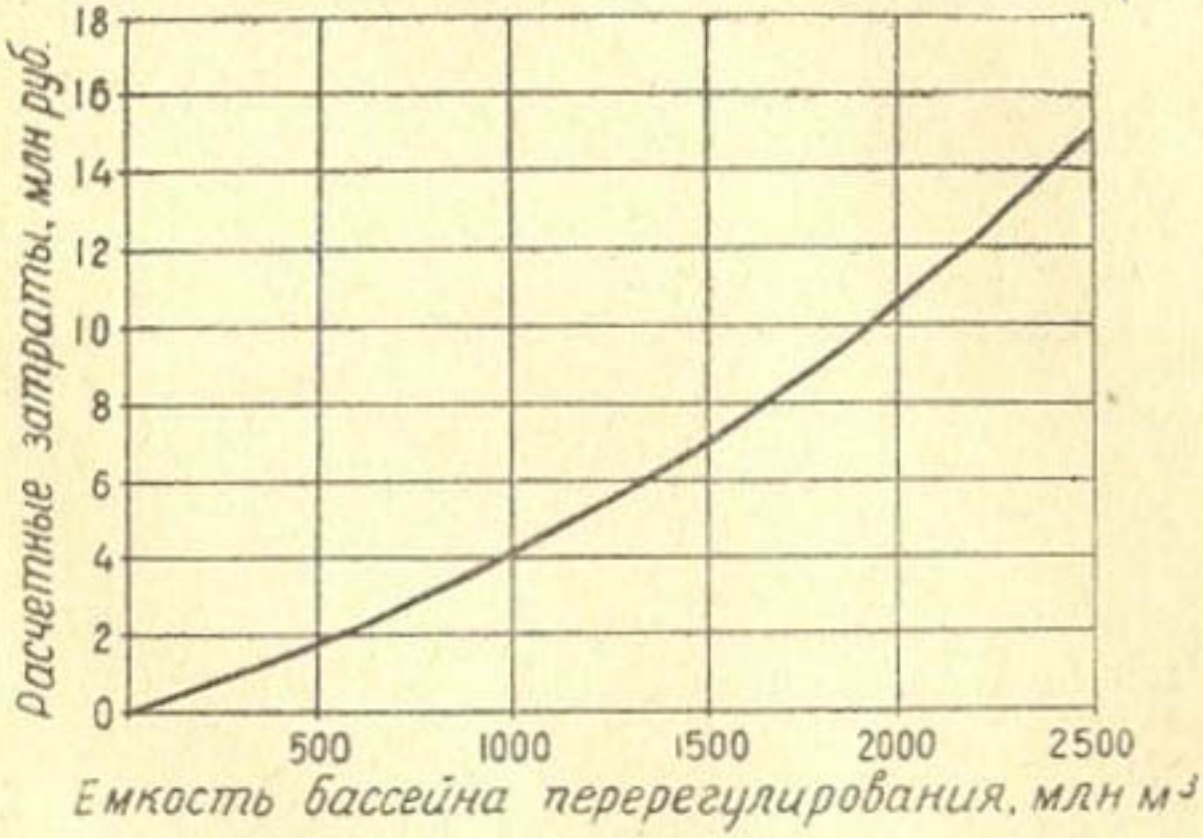


Рис. 43. Зависимость среднегодовых расчетных затрат по бассейну перерегулирования от его полезной емкости.

ГЭС приведены на рис. 42. Если предположить далее, что лучший из возможных створов сооружения бассейна перерегулирования дает зависимость вложений среднегодовых расчетных затрат от его емкости, представленную на рис. 43, то средне-

годовые расчетные затраты по бассейну перерегулирования, необходимые для полной компенсации снижения орошаемых площадей, в зависимости от величины попуска воды ГЭС изобразятся кривой 4 рис. 44. Зависимости 1, 2, 3 и 5 будут те же, что и на рис. 31.

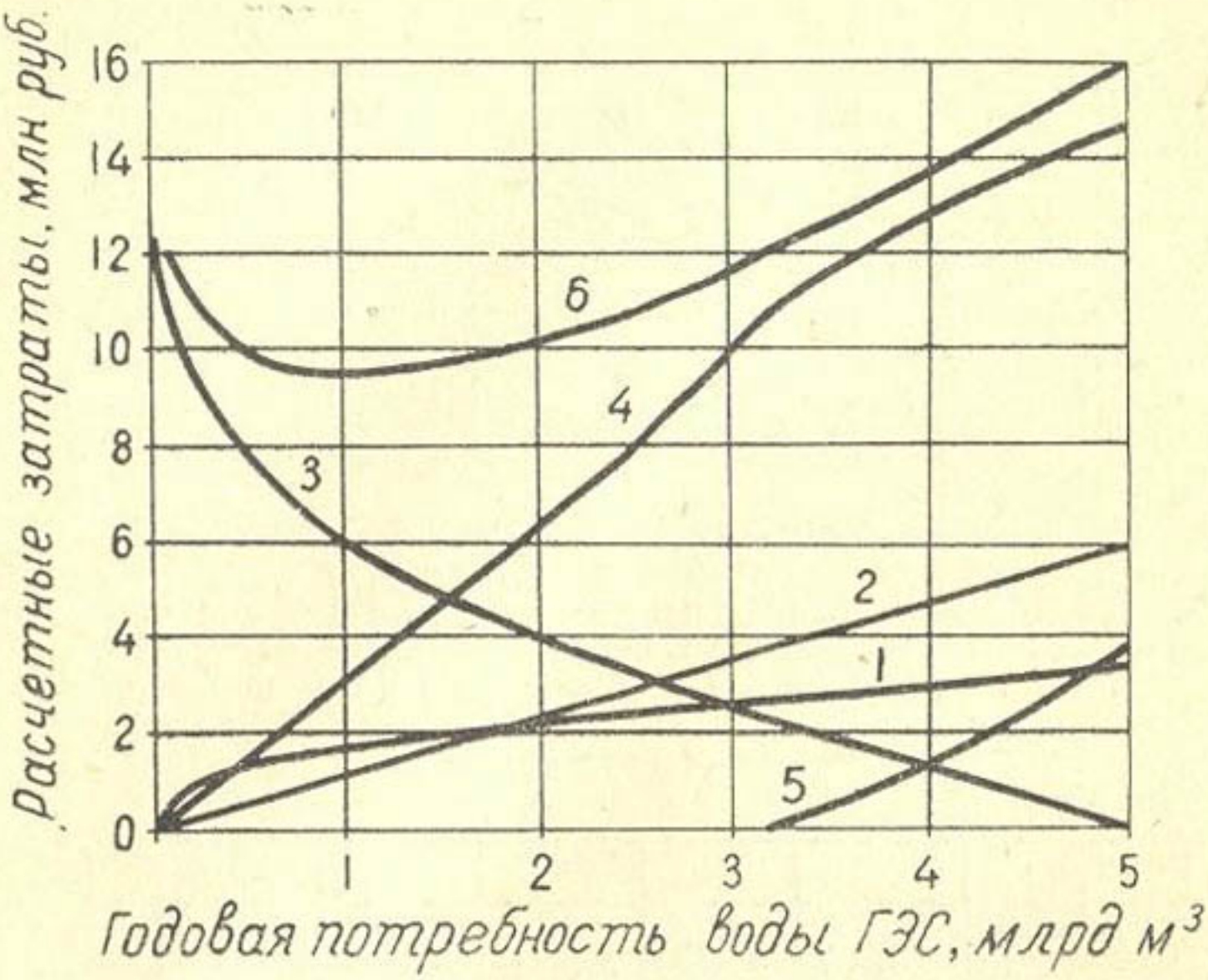


Рис. 44. Среднегодовые расчетные затраты в ГЭС *1*, сэкономленное топливо *2*, заменяющую КЭС *3*, бассейн перерегулирования *4*, компенсацию дефицита электроэнергии в системе *5* и их сумма *6* в зависимости от величины годовой потребности воды ГЭС для покрытия задачного графика нагрузки (схема IV).

Как видно из рис. 44, при принятых нами весьма хороших условиях для сооружения ГЭС (низкой ее стоимости, дорогой заменяющей КЭС, относительно дешевом бассейне перерегулирования) наивыгоднейшая рабочая мощность ГЭС получается небольшой (~300 тыс. *квт* при числе часов использования ее в течение невегетационного периода года около 650 и пропуске воды за это время около 1/5 стока реки 99,9% обеспеченности). Оптимальная емкость бассейна перерегулирования равна 700 млн $м^3$. Удельные среднегодовые расчетные затраты по бассейну перерегулирования, соответствую-

щие этой емкости, составляют $з_б$=0,0038 *руб/м*^{3}. Если считать, что удельные капиталовложения по бассейну $к_б = \frac{з_б}{0{,}12}$, то $к_б$=0,032 *руб/м*^{3}, что соответствует наиболее экономичным (из запроектированных в СССР) ирригационным водохранилищам (эталонам) сезонного регулирования [9].

Из изложенного ясно, что в случае ирригационно-энергетического использования водных ресурсов реки по схеме IV необходимость создания бассейна для перерегулирования стока в целях ирригации ограничивает наивыгоднейшую величину рабочей мощности ГЭС даже при весьма благоприятных в энергосистеме условиях ее сооружения. Установка рабочей мощности на ГЭС, требующей специальных попусков воды в течение невегетационного периода года при напоре менее 125 *м*, оказывается целесообразной только в случае наличия возможности сооружения очень дешевых бассейнов перерегулирования.

Еще одним очень важным фактором, снижающим целесообразность специальных попусков воды для ГЭС и последующего их перерегулирования для ирригации, является увеличение потерь стока на фильтрацию и испарение из дополнительно создаваемого в этих целях водохранилища. Учесть этот фактор можно путем построения на рис. 44 дополнительной зависимости среднегодовых расчетных затрат на компенсацию уменьшения орошаемой площади в связи с увеличением емкости бассейна перегулирования и потерь стока на фильтрацию и испарение из него. Затраты сельского хозяйства, соответствующие любой принятой емкости бассейна перерегулирования, связанные с потерей стока на фильтрацию и испарение, могут быть примерно оценены по формуле

$$\Delta З_{сх} = \frac{W_п \cdot \Delta з_{га}}{M},$$

где $W_п$ — общие потери стока на фильтрацию и испарение из бассейна перерегулирования, соответствующие принятой его емкости, *м*^{3}*/год*;

$\Delta з_{га}$ — дополнительные среднегодовые расчетные затраты в сельском хозяйстве, *руб/га*, связанные с переходом на заменяющее орошение (площади);

M — оросительная норма одного среднего (структурного) гектара на проектируемом массиве орошения, *м*^{3}*/га*.

§ 8. Сравнение возможных схем комплексного использования водных ресурсов и выбор лучшей из них

В условиях проектирования комплексного ирригационно-энергетического гидроузла в конкретном створе реки схема использования водных ресурсов определяется обычно местом расположения возможных площадей орошения, чаши водохранилища, строительной площадки здания ГЭС и т. д., поэтому ее выбор весьма ограничен. Однако при более широком рассмотрении использования водных ресурсов реки в целом, как правило, может быть намечено несколько схем, различающихся между собой как по достигаемому производственному эффекту, так и по затратам на их осуществление.

Производственные возможности комплекса при различных схемах использования водных ресурсов реки можно сравнить сопоставлением технических его показателей — мощности и производительности компонентов, оптимальных для каждой схемы. Однако такое сравнение не позволяет установить, какая из схем лучше, ибо в каждой из них могут иметь место свои преимущества — большая площадь орошения или мощность гидроэлектростанций. Лучшую схему можно выбрать только сопоставлением суммарных экономических показателей (интегральных за нормативный срок окупаемости или среднегодовых расчетных затрат) по комплексу и дополняющим объектам при условии удовлетворения ими одинаковых потребностей народного хозяйства в мощности и производительности сельского хозяйства и энергетики к расчетному уровню их развития.

Во всех рассмотренных выше (§ 4, 5, 6 и 7) схемах комплексного ирригационно-энергетического использования водных ресурсов приняты одни и те же исходные технические и экономические данные (расходы реки, напор ГЭС, емкость водохранилища, параметры энергосистемы, удельные среднегодовые расчетные затраты на дополнительную мощность и производительность компонентов комплекса, заменяющих объектов и т. д.), что позволяет сравнить их между собой и выбрать лучшие, отвлекаясь от всех других влияющих факторов.

При заданной, одинаковой для всех рассмотренных схем использования водных ресурсов, подпорной отметке и емкости регулирующего водохранилища расчетные потери стока на фильтрацию и испарение из него будут также примерно постоянными и малозависящими от принятого распределения водных ресурсов между компонентами комплекса. Исключение составит схема (IV), в которой имеет место дополнитель-

ная емкость для перерегулирования стока и, следовательно, дополнительные его потери.

Сводные технико-экономические показатели объектов комплексного использования водных ресурсов, рассмотренных в качестве примеров схем I — IV, приведены в табл. 12.

Таблица 12

Сводные технико-экономические показатели объектов комплексного использования водных ресурсов

Схема	Оптимальная площадь орошения при обеспеченности $p=75\%$, тыс. *га*	Рабочая мощность ГЭС, тыс. *квт*	Расчетная выработка энергии ГЭС, млн *квт·ч/год*	Сумма среднегодовых расчетных затрат, млн. *руб/год*
I	715	320	280	100,44
II	570	490	900	98,22
II-а	680	380	1875	93,51
III	600	400	550	100,42
IV	850	300	250	100,78

Суммарные среднегодовые расчетные затраты в табл. 12 подсчитаны для потребностей народного хозяйства в дополнительной полезной мощности энергосистемы $P_0=500$ тыс. *квт;* выработке энергии $Э_0=2000$ млн *квт·ч/год;* площади орошения $F_0=850$ тыс. *га;* при удельных затратах на 1 *га* проектируемого орошения $з_{га}=100$ руб., заменяющего (дополняющего) орошения $з^{зам}_{га}=120$ *руб/га* в год ($\triangle з_{га}=20$ *руб/га* в год, т. е. так же, как это принято в вышеприведенных примерах). Потребности народного хозяйства в дополнительной мощности, выработке и площади орошения в данном случае могли бы быть приняты и большими, однако это не изменило бы приведенных ниже выводов, так как сумма среднегодовых расчетных затрат в табл. 12 изменилась бы на одну и ту же величину во всех рассмотренных схемах. Относительно небольшая разница в величинах суммарных среднегодовых расчетных затрат схем использования водных ресурсов объясняется в основном близостью экономических показателей проектируемого и заменяющего орошения, принятых в примерах.

Применительно к рассмотренным схемам комплексного использования водных ресурсов сопоставление суммарных экономических показателей позволяет сделать вывод, что при

всех прочих равных условиях лучшими являются схемы с использованием воды на орошение после прохождения ее через турбины ГЭС (схемы II и II-а), в особенности если в энергосистеме используется и сезонная выработка энергии (схема II-а). Чем больше забор воды на орошение из верхнего бьефа ГЭС (схемы I и III), тем менее эффективно используются водные ресурсы. Экономическая эффективность схемы с забором воды на орошение из бассейна перерегулирования (схема IV) во многом определяется стоимостью бассейна и величиной потерь стока на фильтрацию и испарение из него.

§ 9. Аналитический способ выбора рабочей мощности ГЭС при ирригационно-энергетическом использовании реки

Проведенный нами анализ некоторых схем комплексного ирригационно-энергетического использования водных ресурсов рек показал, что в большинстве своем гидроэлектростанции даже при весьма благоприятных условиях для их сооружения мало конкурируют в требованиях на воду по сравнению с орошением. Экономически оправдываемые значения величин *специальных попусков воды для гидроэнергетики, приводящие к ограничениям сельского хозяйства,* на крупных реках и напорах ГЭС не более 100 — 125 *м* в большинстве случаев, по-видимому, не будут превышать величин стока реки, близких к 100% обеспеченности.

Предварительную оценку величины рабочей мощности и экономически целесообразного специального попуска воды для проектируемой ГЭС при комплексном ирригационно-энергетическом использовании реки можно сделать исходя из следующих соображений. Параметры отдельных компонентов комплекса и доли используемого ими стока реки должны быть выбраны такими, при которых суммарные народнохозяйственные затраты на производство необходимого количества продукции — электрической мощности и энергии в энергосистеме и сельскохозяйственной продукции в сельском хозяйстве — были бы минимальными. Это условие для случая неэффективности дублирования мощности проектируемой ГЭС в энергосистеме может быть записано следующим образом:

$$\Sigma З = З_0 + з^{г}_{N} N_г + \alpha_N з^{т}_{N} (P_c - N_0 - N_г) + \alpha_э \, sb(Э_c - Э_0 - \bar{Э}_г - \bar{Э}_д) + з_д{}^{э}\bar{Э}_д + з_{га} F + \lambda з^{зам}_{га}(F_c - F) + з^{сх}_{д}\bar{F}_д = f(N_г) = min,$$

где $З_0$ — среднегодовые расчетные затраты по ирригационно-энергетическому комплексу, не зави-

сящие от распределения воды между его компонентами; *руб/год;*

$з^{г}_{N}$ — среднегодовые расчетные затраты на дополнительный киловатт установленной мощности проектирумой ГЭС, *руб/квт* в год;

$з^{т}_{N}$ — то же по заменяющей станции, без учета затрат на выработку энергии, *руб/квт* в год;

P_c; $N_э$; $N_г$ — потребная мощность энергосистемы; рабочая мощность электростанций, не зависящая от мощности проектируемой ГЭС; мощность проектируемой ГЭС, *квт;*

α_N; $\alpha_э$ — коэффициенты сопоставимости мощности и энергии проектируемой ГЭС и заменяющей станции;

$Э_c$;$Э_э$;$\bar{Э}_г$;$\bar{Э}_д$ — потребная выработка энергии в системе; выработка энергии станций, мощность которых не зависит от распределения воды; средняя многолетняя выработка энергии проектируемой ГЭС; средний многолетний дефицит энергии в системе, *квт·ч* в год;

s, b — стоимость в *руб/кг* и удельный расход условного топлива в *кг/квт·ч* выработки энергии заменяющей станции;

$з^{э}_{д}$ — затраты по компенсации 1 *квт·ч* дефицита электроэнергии в системе, зависящие от способа компенсации, *руб/квт·ч;*

$з_{га}$ — среднегодовые расчетные затраты на дополнительный гектар проектируемого массива орошения, *руб/га* в год;

$з^{зам}_{га}$ — то же по заменяющему массиву (источнику орошения), *руб/га* в год;

λ — соотношение урожайности 1 *га* площади на проектируемом и заменяющем массивах орошения;

F_c; F — потребная площадь сельхозугодий; площадь проектируемого массива орошения, *га;*

$\bar{F}_д$ — средняя многолетняя недополиваемая площадь сельхозугодий, *га;*

$з^{сх}_{д}$ — затраты на компенсацию ущерба от недополивов 1 *га*, *руб/га* в год.

Увеличение рабочей мощности ГЭС и ее требований к вод-

ным ресурсам в комплексе снижают оросительную способность реки. Для того чтобы сохранить планируемый выпуск сельскохозяйственной продукции, предусматривается мероприятие по компенсации ее недовыработки (заменяющий массив, источник орошения или др.). Это компенсирующее мероприятие должно иметь ту же степень надежности (расчетную обеспеченность орошения), что и сток, изымаемый для ГЭС. В этом случае средняя многолетняя площадь недополивов $\bar{F}_д$ и ущерб $з^{сх}_д \bar{F}_д$, вызываемый ими, останутся постоянными.

Минимум суммарных затрат $\Sigma З$ достигается при условии $\frac{d\Sigma З}{dN_г} = 0$ или

$$з^{г}_N - \alpha_N з^{т}_N - \alpha_э sb\frac{d\bar{Э}_г}{dN_г} - \alpha_э sb\frac{d\bar{Э}_д}{dN_г} + з^{э}_д \frac{d\bar{Э}_д}{dN_г} + з_{га}\frac{dF}{dN_г} - \lambda з^{зам}_{га}\frac{dF}{dN_г} = 0.$$

Производная $\frac{d\bar{Э}_г}{dN_г}$ в конечных приращениях может рассматриваться как прирост средней многолетней выработки энергии ГЭС при установке на ней дополнительного киловатта рабочей мощности. Обозначим его $\Delta\bar{Э}_г$*. Аналогично $\frac{d\bar{Э}_д}{dN_г}$ представит собой прирост среднего многолетнего дефицита энергии в системе при изменении мощности ГЭС на 1 *квт*, обозначим его $\Delta\bar{Э}_д$. Учитывая далее, что специальный дополнительный пропуск воды на ГЭС ΔW в течение невегетационного периода приведет к увеличе-

---

* Производнук $\frac{d\bar{Э}_г}{dN_г}$ для рабочей мощности, имеющую размерность «часы», можно назвать числом часов использования дополнительного киловатта рабочей мощности ($\bar{h}_{г\,раб}$); однако это не совсем точно, ибо каждый дополнительный киловатт рабочей мощности ГЭС в графике нагрузки энергосистемы имеет все большее число часов использования, прирост же средней многолетней выработки энергии ГЭС стремиться при этом к нулю. В пределе установка дополнительного киловатта рабочей мощности на ГЭС может не увеличить общей ее выработки, однако это вовсе не значит, что этот киловат не будет работать.

нию ее рабочей мощности на $\Delta N_г = \frac{8\Delta W H}{3600\, h_э}$, где $h_э$ — число часов использования этой дополнительной мощности на специальных попусках воды для ГЭС, приводящих к ограничениям сельского хозяйства в расчетном для него году (и во все годы меньшей водности), а орошаемая площадь проектируемого массива уменьшится при этом на $\Delta F = \frac{-\Delta W}{M}$, где M — оросительная норма одного среднего (структурного) гектара, найдем:

$$\frac{dF}{dW} = -\frac{1}{M};\ \frac{dN_г}{dW} = \frac{H}{450 \cdot h_э};\ \frac{dF}{dN_г} = \frac{dF}{dW} \cdot \frac{dW}{dN_г} = -\frac{450 h_э}{MH};$$

$$з^г_N - \alpha_N з^г_N + \Delta\bar{Э}_д(з^э_д - \alpha_э sb) - \alpha_э sb\Delta\bar{Э}_г + \frac{450 h_э}{MH}\Delta з_{га} = 0, \quad (43)$$

где $$\Delta з_{га} = \lambda з^{зам}_{га} - з_{га}.$$

Из уравнения (43) экономически оправдываемое число часов использования предельного дополнительного киловатта развития рабочей мощности ГЭС при работе его на специально пропускаемой для гидроэнергетики воде будет равно

$$h_{э.эк} = \frac{[\alpha_N з^г_N + \alpha_э\, sb\Delta\bar{Э}_г - з^г_N - \Delta\bar{Э}_д(з^э_д - \alpha_э\, sb)]MH}{450\Delta з_{га}}. \quad (44)^*$$

Если установленная мощность ГЭС больше рабочей, можно с некоторым приближением принять

---

* Размерность

$$h_{э.эк.} = \frac{\left[\frac{руб}{квт \cdot год} + \frac{руб}{кг} \cdot \frac{кг}{квт \cdot час} \cdot \frac{час}{год} - \frac{руб}{квт \cdot год} - \frac{час}{год}\left(\frac{руб}{квт \cdot час} - \frac{руб}{кг} \cdot \frac{кг}{квт \cdot час}\right)\right]\frac{м^3 \cdot м}{га \cdot год}}{450\,\frac{руб}{га \cdot год}};$$

учитывая, что $450 = \frac{3^2 00}{9{,}81\eta} = \frac{сек \cdot сек^2}{час \cdot м}$, а $квт = \frac{м^3}{сек^3}$ $(N = 9{,}8\eta \cdot QH)$, окончательно получим $h_{э.эк} = часов\ в\ год$.

$$h_{э.эк} = \frac{[\alpha_N\, з^{г}_N - \Delta\bar{Э}_д(з^{э}_д - \alpha_э\, sb)]\,MH}{450\Delta з_{га}}, \qquad (45)$$

так как в этом случае изменение величины рабочей мощности не потребует специальных затрат в ГЭС ($з^{г}_N = 0$), а средняя многолетняя выработка энергии $\bar{Э}_г$ останется практически постоянной*.

Выработка энергии ГЭС в течение невегетационного периода года на специально пропускаемой для гидроэнергетики воде составляет лишь долю от средней многолетней $\Delta\bar{Э}_г = h_э + \gamma h_э$, поэтому (44) можно записать в следующем виде:

$$h_{э.эк.} = \frac{[\alpha_N\, з^{г}_N - з^{г}_N - \Delta Э_д(з^{э}_д - \alpha_э sb)]\,MH}{450\Delta з_{га} - (1+\gamma)\alpha_э\, sbMH}. \qquad (46)$$

Здесь $\gamma h_э$ — выработка энергии дополнительного киловатта мощности ГЭС на ирригационных попусках и возможных излишках воды в реке, выраженная в долях γ от выработки на специально пропускаемой для гидроэнергетики воде. В общем случае γ — переменная величина, зависящая от места дополнительного киловатта в графике нагрузки энергосистемы, размеров сезонных избытков воды в реке и т. д.

Если годовая экономия затрат на топливе в энергосистеме от установки дополнительного киловатта мощности на ГЭС [$h_э(1+\gamma)sb$, см. уравнение 46] будет меньше дополнительных затрат в сельском хозяйстве, вызванных специальным энергетическим попуском $\left[\frac{450\Delta з_{га} h_э}{MH}\right]$, то минимум суммарных затрат по комплексу будет иметь место при числе часов его использования на специально пропускаемой воде $h_э$ равном экономически оправдываемому $h_{э.эк}$.

Если же дополнительные затраты в сельском хозяйстве

---

* В общем случае при увеличении рабочей и постоянной установленной мощности ГЭС средняя многолетняя выработка энергии несколько возрастет за счет использования большего количества воды зимой и уменьшения возможных сбросов воды летом. Однако учет этого увеличения выработки энергии практически не уточняет расчетной величины рабочей мощности ГЭС вследствие, во-первых, незначительности его и, во-вторых, наличия не точки, а зоны минимума затрат по комплексу, в пределах которой возможная ошибка в выборе мощности практически не сказывается на суммарных затратах.

меньше, чем дополнительная экономия на топливе (знаменатель в выражении (46) при этом отрицательная величина), уравнения (44) и (46) дают число часов использования дополнительного киловатта мощности ГЭС, при которой суммарные затраты по комплексу максимальны. Минимум затрат в этом случае будет или при мощности ГЭС равной нулю или при максимальном ее значении, соответствующем максимуму удовлетворения потребностей в воде ГЭС. Окончательно это можно установить путем подсчета суммарных затрат и их сравнения для этих предельных значений мощности ГЭС. При положительном числителе (46) экономически эффективно максимальное удовлетворение потребностей в воде гидроэнергетики.

В примере рис. 26 ГЭС работает на специально пропускаемой для гидроэнергетики воде в течение всего года и возможности сезонной выработки энергии не учитываются. В этом случае $\gamma=0$ и экономически оправдываемое число часов работы предельного киловатта рабочей мощности ГЭС в течение года не должно превышать (см. 46)

$$h_{э.эк}=\frac{(1{,}20\cdot 17-5{,}6)125\cdot 7000}{450\cdot 20-1{,}06\cdot 0{,}01\cdot 0{,}4\cdot 7000\cdot 125}=2450\ ч.$$

Из рис. 15 и 16 или построенной по ним зависимости числа часов использования дополнительного киловатта мощности пиковых ГЭС энергосистемы от величины их мощности (рис. 45) видно, что это значение $h_{э.эк}$ соответствует рабочей мощности ГЭС 320 тыс. *квт*, так же как и при графическом решении (рис. 27).

В примере рис. 30 ГЭС работает на специально пропускаемой для гидроэнергетики воде только в течение невегетационного периода года (X—III месяцы) и $\gamma\sim 1$ (выработки энергии дополнительного киловатта мощности ГЭС в течение вегетационного и невегетационного периодов примерно равны $h_э \simeq h_н$; см. рис. 45)

$$h_{э.эк}=\frac{(1{,}20\cdot 17{,}0-5{,}6)125\cdot 7000}{450\cdot 20-2\cdot 1{,}06\cdot 0{,}01\cdot 0{,}4\cdot 125\cdot 7000}>4380\ ч,$$

т. е. любой дополнительный киловатт на ГЭС оправдывается даже при базовой его работе в покрытии графика нагрузки энергосистемы в течение всего невегетационного периода года (равного в нашем случае 6 месяцам или 4380 *ч*). Однако при этом годовое потребление воды ГЭС выйдет за пределы величины стока реки 100% обеспеченности и будут иметь место

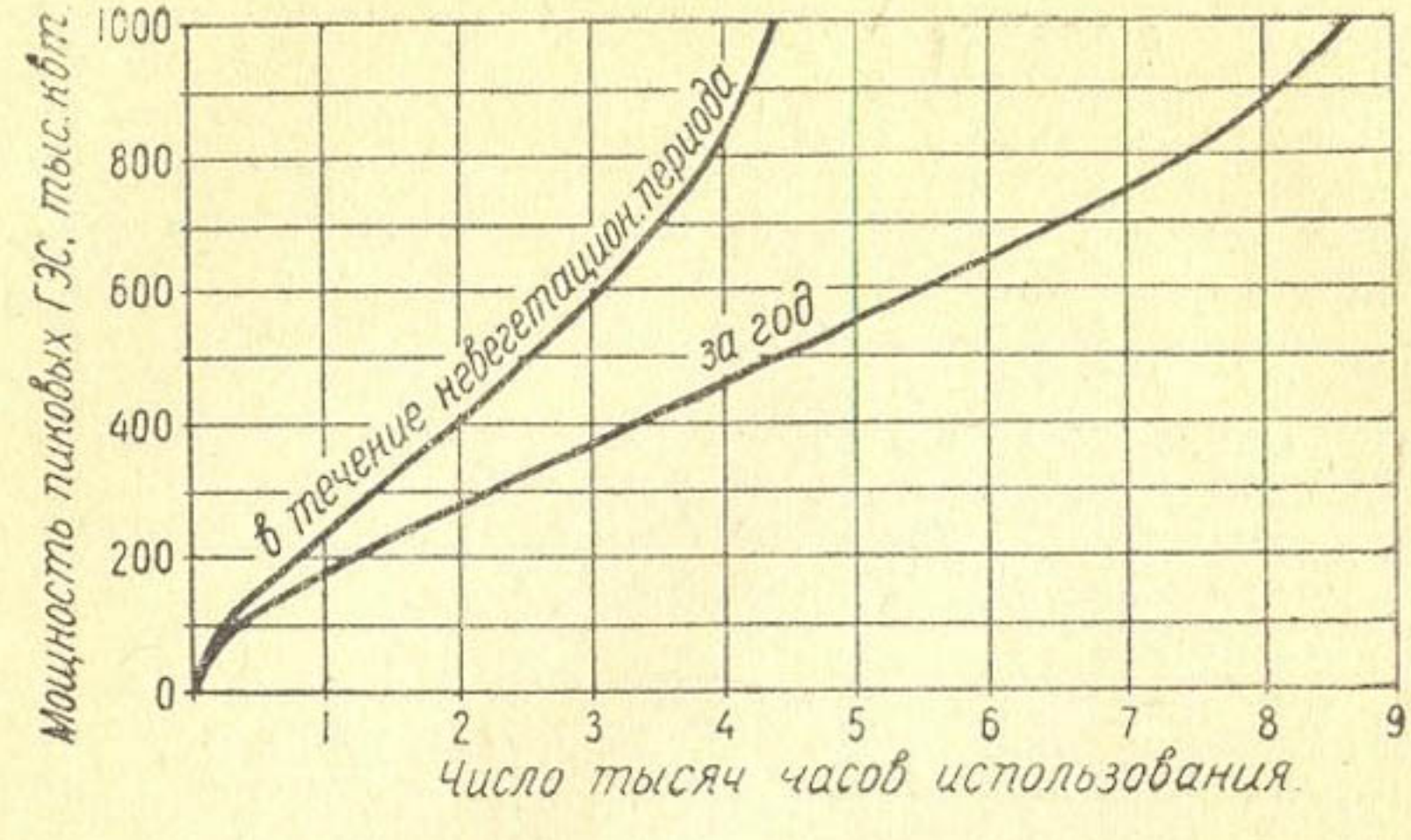


Рис. 45. Зависимости числа часов использования в графике нагрузки энергосистемы дополнительного киловатта на пиковых ГЭС от величины их рабочей мощности.

дефициты воды и ущербы от недовыработки энергии в системе. Дефициты появятся при мощности ГЭС около 500 тыс. *квт* (см. стр. 135); удельная величина дефицита на дополнительный киловатт мощности при этом составляет

$$\Delta\bar{Э}_д = \frac{(73{,}4-3{,}6)\cdot 10^6}{(600-500)\cdot 10^3} = 698 \ квт\cdot ч/квт.$$

Удельный ущерб принят нами в примере равным 0,05 *руб/квт·ч*. С учетом затрат на компенсацию ущерба, вызываемого дефицитом энергии,

$$h_{э.эк} = \frac{[1{,}2\cdot 17{,}0 - 5{,}6 - 698(0{,}05 - 1{,}06\cdot 0{,}01\cdot 0{,}4)]\cdot 7000\cdot 125}{450\cdot 20 - 2\cdot 1{,}06\cdot 0{,}01\cdot 0{,}4\cdot 125\cdot 7000} < 0,$$

т. е. при появлении дефицитов рабочая мощность на ГЭС становится неэффективной. Следовательно, оптимальным значением величины ее рабочей мощности будет такое, при котором потребление воды равно стоку реки 99,9% обеспеченности.

Для примера рис. 39—40, где установленная мощность ГЭС больше рабочей (см. 45),

$$h_{э.эк} = \frac{1{,}2\cdot 17{,}0\cdot 125\cdot 7000}{450\cdot 20} = 1980 \ ч,$$

что соответствует (как и при графическом решении, рис. 40) рабочей мощности ГЭС около 380 тыс. *квт* (см. рис. 45).

В случае, когда дублирование мощности ГЭС в энергосистеме неэффективно ($N^{г}_{у}=N^{г}_{р}$) и соотношение между выработками энергии на специальных для энергетики и ирригационных попусках воды является переменной величиной, зависящей от величины рабочей мощности ($\gamma = Vari$), необходимо подсчитать (по формуле 44) экономически оправдываемое число часов использования дополнительного киловатта ($h_{э.эк}$) для нескольких значений мощности и построить зависимость $h_{э.эк}=f(N^{г}_{р})$. Точка пересечения ее с зависимостью числа часов использования дополнительного киловатта мощности ГЭС (рис. 45 и 46), соответствующая равенству $h_{э.эк} = h_{э}$, покажет оптимальную величину рабочей мощности ГЭС.

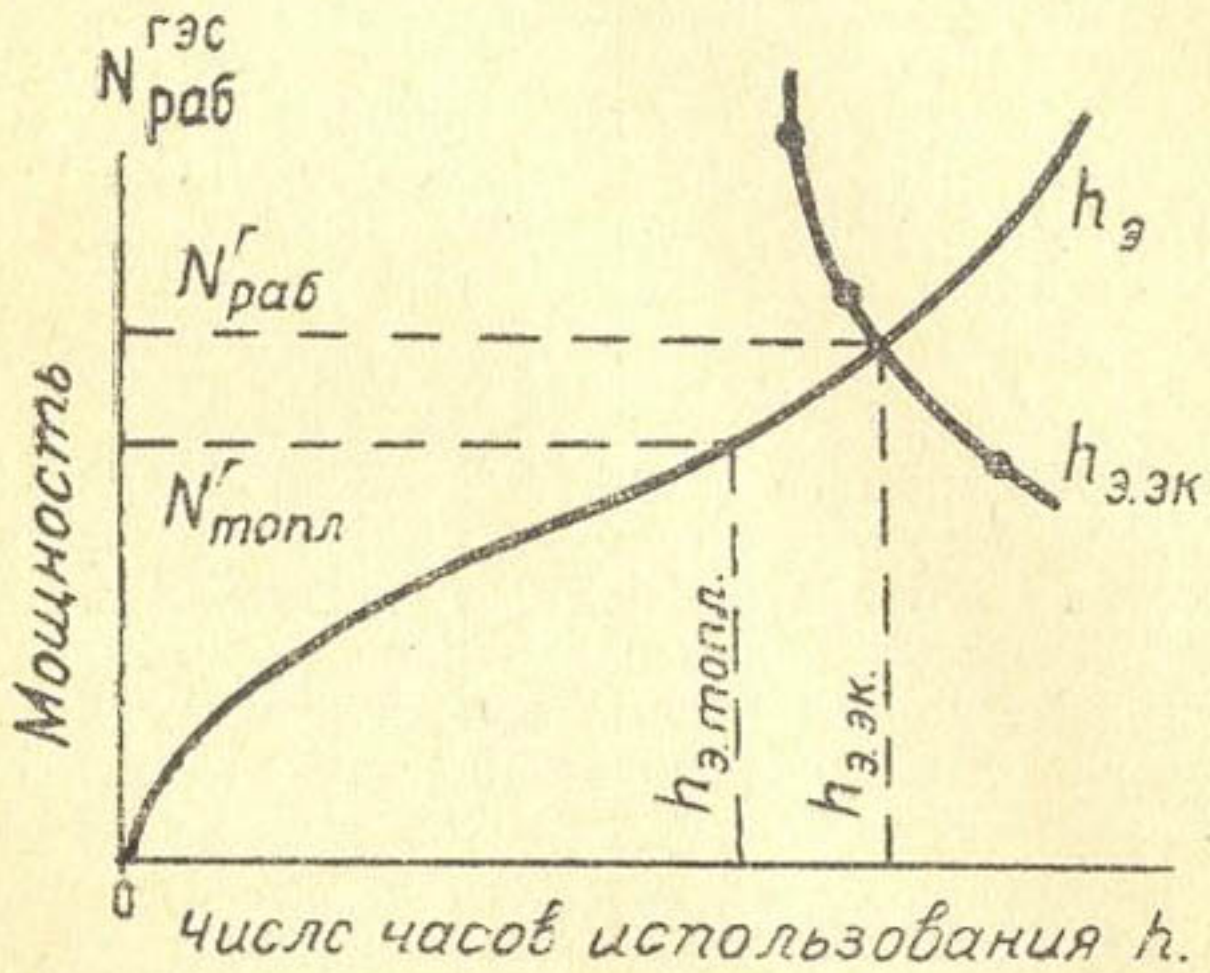


Рис. 46. Число часов использования дополнительного киловатта на специально пропускаемой для него воде в зависимости от величины рабочей мощности ГЭС.

Чтобы установить, целесообразно или нет дублирование мощности ГЭС в энергосистеме, можно воспользоваться следующими рассуждениями. Предположим, что дублирование нецелесообразно. В этом случае рабочая мощность ГЭС будет равна установленной и больше оправдываемой из условия экономии топлива $N^{г}_{р}=N^{г}_{у}>N^{г}_{\text{топл.}}$ Затраты на дополнительный киловат мощности ГЭС не оправдываются экономией топлива $z^{г}_{N}>\alpha_{э}sb\Delta\overline{Э}_{г}$, а затраты на дополнитель-

ную мощность КЭС больше дополнительных затрат в сельском хозяйстве и затрат на компенсацию возможного дефицита энергии (см. 43):

$$\alpha_N 3^{\text{т}}_N > \Delta 3_{га} \frac{450 \cdot h_{\text{э.топл.}}}{HM} + \Delta \bar{Э}_д (3^{э}_д - \alpha_э \, sb),$$

откуда число часов использования дополнительного киловатта рабочей мощности, соответствующего $N^{\text{г}}_{\text{топл.}}$, на специально пропускаемой для него воде составит

$$h_{\text{э.топл.}} < \frac{[\alpha_N 3^{\text{т}}_N - \Delta \bar{Э}_д (3^{э}_д - \alpha_э \, sb)]MH}{450 \Delta 3_{га}},$$

что соответствует $h_{\text{э.эк}}$ при $N^{\text{г}}_y > N^{\text{г}}_p$ (см. 45).

Следовательно, дублирование мощности ГЭС в энергосистеме нецелесообразно, если число часов использования дополнительного киловатта рабочей мощности ГЭС, соответствующего мощности ГЭС, оправдываемой из условия экономии топлива ($N^{\text{г}}_{\text{топл.}}$), будет меньше экономически оправдываемого при дублировании:

$$h_{\text{э.топл.}} < h_{\text{э.эк.}} \text{при } N^{\text{г}}_y > N^{\text{г}}_p . \qquad (47)$$

Так, в нашем примере на рис. 36—37 экономически оправдываемая мощность ГЭС из условия экономии топлива равна 400 тыс. *квт*. Если принять всю эту мощность рабочей, то 400-тысячный киловатт на специально пропускаемой для гидроэнергетики воде должен будет работать в течение $h_{\text{э.топл.}} = 2000$ *ч* (см. рис. 45), экономически же оправдывается при $N^{\text{г}}_y > N^{\text{г}}_p$

$$h_{\text{э.эк}} = \frac{1{,}2 \cdot 17{,}0 \cdot 125 \cdot 7000}{450 \cdot 20} = 1980 \text{ ч.}$$

$h_{\text{э.топл}} > h_{\text{э.эк}}$. Рабочая мощность ГЭС будет меньше установленной. Дублирование эффективно, что и получилось в расчетах примера рис. 35 и 36.

Полученные выражения для определения экономически обоснованного числа часов использования на специально пропускаемой для гидроэнергетики воде дополнительного киловатта рабочей мощности ГЭС (44, 45, 46), числа часов использования дублируемого киловатта (42) и условия неэффективности дублирования (47) позволяют наметить следующий порядок определения наивыгоднейшей установленной и рабочей

мощности ГЭС при комплексном ирригационно-энергетическом использовании реки:

1. Для нескольких значений установленной мощности $N^{г}_{у}$ подсчитывается ее средняя многолетняя выработка энергии $\overline{Э}_{г}$ и строится зависимость $\overline{Э}_{г}=f(N^{г}_{у})$ при условии полного удовлетворения требований на воду со стороны сельского хозяйства. Требования сельского хозяйства определяются при этом расчетной обеспеченностью орошения, оросительной нормой структурного гектара и его графиком гидромодуля.

2. Определяется и строится зависимость (рис. 37) числа часов использования дополнительного киловатта от установленной мощности ГЭС $\overline{h}_{г}=f(N^{г}_{у})$.

3. Подсчитывается экономически оправдываемое число часов использования дополнительного киловатта установленной мощности ГЭС (42), и из зависимости $\overline{h}_{г}=f(N^{г}_{у})$ (рис. 37) определяется соответствующая ему мощность $N^{г}_{у}$.

4. Для нескольких значений рабочей мощности ГЭС $N^{г}_{р}$ определяются потребные выработки энергии в графике нагрузки энергосистемы, приводящие к ограничениям сельского хозяйства в расчетном для него году $Э^{сх}_{г}$, и возможные средние многолетние дефициты энергии $\overline{Э}_{д}$ и строятся зависимости их приростов $h_{э}$ и $\Delta\overline{Э}_{д}$ в функции от $N^{г}_{р}$.

5. Принимая условно всю мощность ГЭС, оправдываемую из условия экономии топлива $N^{г}_{у}$, рабочей, из зависимости $h_{э}=f(N^{г}_{р})$ (рис. 46) найдем соответствующее ей число часов использования дополнительного киловатта на специально пропускаемой воде $h_{э.топл.}$ и сравним его с экономически оправдываемым $h_{э.эк.}$ (45) при $N^{г}_{у}>N^{г}_{р}$ (47).

Дальнейшие расчеты по определению рабочей мощности ГЭС пойдут по одному из трех путей в зависимости от соотношения $h_{э.топл.}$ и $h_{э.эк}$ (45).

I. Если $h_{э\ эк.}(45)$ окажется меньше $h_{э.топл.}$, то рабочая мощность ГЭС будет меньше установленной, в энергосистеме эффективно дублирование части мощности ГЭС. Оптимальную ее рабочую мощность можно найти из рис. 46, подставляя в него значение $h_{э.эк.}$ (45).

II. Если $h_{э\ эк.}$ (45) окажется больше $h_{э.топл}$, то рабочая мощность ГЭС будет больше оправдываемой из условия экономии топлива и дублирование мощностей в энергосистеме неэффективно. Рабочая мощность ГЭС найдется путем под-

счета $h_{э.эк.}$ (по уравнению 44 или 46) для нескольких ее значений и построения на рис. 46 дополнительной зависимости $h_{э.эк.}=f(N^{г}_{р}$.). Точка пересечения укажет оптимальную рабочую и установленную мощность ГЭС. При известном соотношении γ между выработкой энергии на специально пропускаемой для ГЭС воде и выработкой на ирригационных попусках удобнее пользоваться выражением (46). При пользовании (44) прирост средней многолетней выработки $\Delta\overline{Э}_{г}$ для каждого значения мощности может быть с некоторым приближением взят равным соответствующему числу часов использования дополнительного киловатта дублируемой мощности $\overline{h}_{г}$ (рис. 37).

III. Равенство $h_{э.эк.}$ (45) и $h_{э.топл.}$ показывает, что рабочая мощность $N^{г}_{р}$ будет равна мощности, оправдываемой из условия экономии топлива $N^{г}_{топл.}$.

Анализируя полученные формулы для определения экономически оправдываемого числа часов использования дополнительного киловатта рабочей мощности ГЭС при комплексном ирригационно-энергетическом использовании реки (44, 45, 46), можно сделать некоторые весьма интересные выводы:

1. В пределах имеющихся объемов воды в реке и при комплексном ирригационно-энергетическом их использовании нижняя граница размещения рабочей мощности ГЭС в графике нагрузки энергосистемы, определяемая выражениями (44), (45), (46), не зависит от величины самой мощности ГЭС. Следовательно, при наличии воды наивыгоднейшая величина рабочей мощности ГЭС будет определяться только величиной свободного места в графике нагрузки энергосистемы в пределах от этой нижней границы до вершины «пика». Если эта зона графика нагрузки уже занята другими (существующими или проектируемыми) станциями, то специальные энергетические попуски воды и установка рабочей мощности на проектируемой ГЭС экономически нецелесообразны. Действительно, рассматривая любой киловатт рабочей мощности ГЭС, можно сказать о целесообразности его установки только в том случае, если при этом произойдет уменьшение суммарных затрат (в энергетике и сельском хозяйстве). Первый киловатт проектируемой ГЭС, располагаясь в верхней части графика нагрузки энергосистемы, более эффективен, чем каждый последующий, располагающийся ниже, ибо он вытесняет ту же мощность на заменяющей ТЭС, но требует меньше воды и поэтому меньший ущерб наносит сельскому хозяйству. Предлагаемые формулы (44, 45, 46) позволяют

сразу определить тот самый нижний в графике нагрузки энергосистемы киловатт мощности проектируемой ГЭС, который уже практически не дает снижения суммарных затрат. Его положение (число часов использования) в графике нанагрузки энрегосистемы при этом не будет зависеть от того, сколько киловатт (все они более эффективны, чем этот последний) располагается выше. Важно лишь, чтобы на него хватило воды. При недостаче воды появятся дефициты энергии, которые повысят нижнюю границу размещения рабочей мощности ГЭС в графике нагрузки энергосистемы (см. 44, 45, 46). Этот вывод нетрудно проверить и графическими методами, изложенными в предыдущих параграфах.

Если принять в примере § 4, что в пике графика нагрузки энергосистемы (см. рис. 15) располагается существующая станция мощностью 100 тыс. *квт*, и считать, что проектируемая ГЭС будет располагаться сразу же за нею, ниже, то наивыгоднейшая меличина рабочей мощности проектируемой ГЭС определится (методически теми же самыми расчетами, см. § 4) равной около 200 тыс. *квт*, т. е. на 100 тыс. *квт* меньше, чем в примере § 4. При мощности существующей пиковой ГЭС 200 тыс. *квт* наивыгоднейшая мощность проектируемой ГЭС будет равна ~100 тыс. *квт*. При мощности существующей пиковой ГЭС 300 тыс. *квт* установка рабочей мощности на проектируемой ГЭС окажется вообще экономически нецелесообразной.

2. Во всех рассмотренных выше (§ 4, 5, 6, 7) схемах комплексного использования реки мы исходили из соображения, что никаких других специальных (санитарных, рыбных и др.) возможных для использования на ГЭС попусков воды в течение невегетационного периода года вниз по реке не требуется. Однако в полученных зависимостях (44, 45, 46) не отражается общее потребление воды ГЭС ни за этот период, ни за год в целом. Следовательно, если такие попуски в действительности имеют место и если они меньше расходов ГЭС, то их учет не изменит выбранного оптимального значения рабочей мощности. Если эти обязательные попуски больше расходов ГЭС, то ее рабочую мощность можно выбирать ориентируясь только на них, без увязки интересов с ирригацией.

3. При комплексном ирригационно-энергетическом использовании реки на эффективность ГЭС и ее конкурирующую с орошением способность большое влияние оказывают используемый напор и оросительные нормы сельхозкультур. Чем больше напор ГЭС, тем конкурентноспособнее она при всех тех же удельных экономических показателях. Так, увеличение

напора ГЭС до 220 *м* (см. 46) в примере § 4 увеличивает экономически оправдываемое число часов использования предельного киловатта мощности ГЭС до $h_э$=8760 *ч.*, т. е. делает ее конкурентноспособной с орошением даже при работе в базе графика нагрузки энергосистемы.

Увеличение оросительной нормы также повышает конкурентноспособность ГЭС. При оросительной норме несколько большей 12000 *м*³/*га* ГЭС тоже становится эффективной при базовой ее работе.

§ 10. Выбор рабочей мощности гидроэлектростанций в каскаде гидроузлов

Выбор рабочей мощности ГЭС в каскаде гидроузлов при комплексном ирригационно-энергетическом использовании реки усложняется по сравнению с выбором мощности индивидуальных ГЭС в связи с наличием у каскада ряда особенностей. В каскаде из нескольких водохранилищ с различными объемами, последовательно расположенными на водотоке, в отличие от водохранилищ, расположенных на разных реках, существует определенная связь между количеством воды, используемым на отдельных его ступенях, а в случае взаимного подпора гидроустановок, существует и некоторая связь в напорах. Водная связь выражается в том, что вода вышележащих водохранилищ, если рассматривать полный цикл наполнения и опорожнения водохранилищ, поступает в нижележащие, срабатываясь далее на их напоре. Напорная связь в случае каскада со взаимным подпором гидроузлов выражается в том, что при сработке нижележащих водохранилищ каскада происходит некоторое повышение напора вышележащих. Каскады со взаимным подпором гидроузлов являются энергетически более эффективными, так как позволяют более полно использовать падение реки.

Особенностью каскада при комплексном ирригационно-энергетическом использовании гидроузлов является и то, что забор воды на орошение может быть произведен из промежуточных ступеней каскада, т. е. после частичного ее использования для выработки электроэнергии. При этом могут иметь место следующие случаи:

1. Забор воды на орошение в течение вегетационного периода не вызывает снижения величины рабочей мощности и выработки энергии расположенных ниже водозабора ГЭС. В этом случае эффективность забора воды обосновывается исключительно соображениями улучшения экономики сельского хозяйства.

2. Забор воды не приводит к снижению рабочей мощности гидроэлектростанций, но уменьшает выработку их сезонной энерги. В этом случае эффективность забора объема воды ΔW определяется превышением экономического эффекта от его использования в сельском хозяйстве над ущербом в энергетике, вызванным увеличением расхода топлива на КЭС энергосистемы; математически это условие запишется следующим образом:

$$\frac{\alpha_э \Delta W H b s}{450} < \frac{\Delta W}{M} \Delta з_{га} ,$$

где $\frac{\Delta W H}{450}$ — снижение выработки энергии ГЭС;

H — их суммарный напор;

b — удельный расход;

s — стоимость топлива на заменяющей ТЭС;

$\frac{\Delta W}{M} = \Delta F$ — дополнительная орошаемая площадь;

$\Delta з_{га}$ — удельная экономия *руб/га* в сельском хозяйстве.

Забор воды на орошение из верхнего бьефа гидроэлектростанций в данном случае будет эффективен при условии, если их суммарный напор

$$H < \frac{450 \Delta з_{га}}{\alpha_э M b s} .$$

При дополнительных удельных среднегодовых затратах в сельском хозяйстве $\Delta з_{га} = 20$ *руб/га*, коэффициенте сопоставимости выработки энергии ГЭС и заменяющей ее выработки КЭС $\alpha_э = 1{,}06$, оросительной норме $M = 7000$ *м³/га*, удельном расходе топлива на заменяющей КЭС $b = 0{,}4$ *кг/квт.ч* и стоимости топлива $s = 0{,}01$ *руб/кг* забор воды на орошение из верхнего бьефа ГЭС будет эффективен при суммарном напоре ГЭС

$$H < \frac{450 \cdot 20}{1{,}06 \cdot 7000 \cdot 0{,}4 \cdot 0{,}01} = 300 \text{ м}.$$

При напорах более 300 *м* забор воды на орошение в данном случае становится неэффективным.

3. Забор воды на орошение приводит к снижению выработки энергии и рабочей мощности гидроэлектростанций. Снижение величины рабочей мощности при изъятии объема воды ΔW в этом случае составит $\Delta N = \frac{\Delta W H}{450 h}$, где h — число часов использования в годовом графике нагрузки энергосисте-

мы дополнительного киловатта рабочей мощности гидроэлектростанций, которые могут работать на этой воде. Уменьшение мощности гидроэлектростанций снизит и вложения в них на величину (в расчетных среднегодовых затратах) $\Delta N з^{r.}_{N}$ а также возможные дефициты энергии и затраты на их компенсацию $\Delta \bar{Э}_д \Delta N(з^э_д - \alpha_э sb)$. Сельское хозяйство в этом случае снизит свои затраты на $\Delta F \Delta з_{га}$, где $\Delta F = \frac{\Delta W}{M}$.

Забор воды на орошение будет экономически эффективен, если суммарное снижение среднегодовых расчетных затрат в ГЭС и сельское хозяйство будет больше, чем их перерасход в заменяющую КЭС, т. е.

$$\Delta N з^{r.ср}_{N} + \Delta N \Delta \bar{Э}_д (з^э_д - \alpha_э sb) + \Delta F \Delta з_{га} > \Delta N(\alpha_N з^т_N + \alpha_э sbh).$$

Подставляя значения ΔN, ΔF и решая это неравенство относительно h, получим, что

$$h > \frac{[\alpha_N з^т_N - з^{r.ср}_{N} - \bar{\Delta} Э_д (з^э_д - \alpha_э sb)]MH}{450 \Delta з_{га} - \alpha_э sbMH}. \qquad (46^1)$$

Следовательно, забор воды на орошение из верхнего бьефа гидроэлектростанций экономически эффективен лишь при условии, если число часов использования ограничиваемого киловатта уменьшения мощности ГЭС будет больше h (46^1). Сравнивая расчетное выражение для h с уравнением эффективности специальных попусков воды для гидроэнергетики (46), видим, что они идентичны, но имеют обратные знаки неравенства.

$з^{r.ср}_{N}$ —среднегодовые расчетные затраты на средний дополнительный киловатт рабочей мощности проектируемых гидроэлектростанций каскада, использовавших бы забираемую на орошение воду. Их величина приближенно может быть определена из выражения

$$з^{r.ср.}_{N} = \frac{з^{г1}_{N} H_1 + з^{г2}_{N} H_2 + \cdots + з^{гn}_{N} H_n}{H_1 + H_2 + \cdots + H_n}, \qquad (48)$$

где 1, 2 ... n — нумерация гидростанций каскада.

При сезонном регулировании стока водохранилищами каскада и при избытке площадей под сельскохозяйственные угодья в случае отсутствия других специальных (санитарных, рыбных и др.) попусков воды в течение невегетационного периода года нижние ступени не смогут иметь рабочей мощно-

сти на ГЭС, не приводящей к ограничениям сельского хозяйства. Вторые снизу гидроэлектростанции каскадов смогут иметь такую мощность за счет пропуска в течение невегетационного периода года расходов, перерегулируемых нижним водохранилищем. Каждая следущая ГЭС сможет иметь еще большую рабочую мощность, не приводящую к ограничениям сельского хозяйства, так как сможет пропускать в нижний бьеф в течение невегетационного периода года объем стока реки, равный сумме свободных объемов нижележащих водохранилищ. Наконец, при наличии свободных емкостей (равных полезному объему водохранилищ без емкости, необходимой для зарегулирования в целях ирригации боковой приточности реки), достаточных для полного перерегулирования стока в целях ирригации, мощности всех вышележащих ГЭС могут выбираться независимо от режима потребления воды сельским хозяйством. Методика выбора параметров ГЭС для подобных случаев имеется [25].

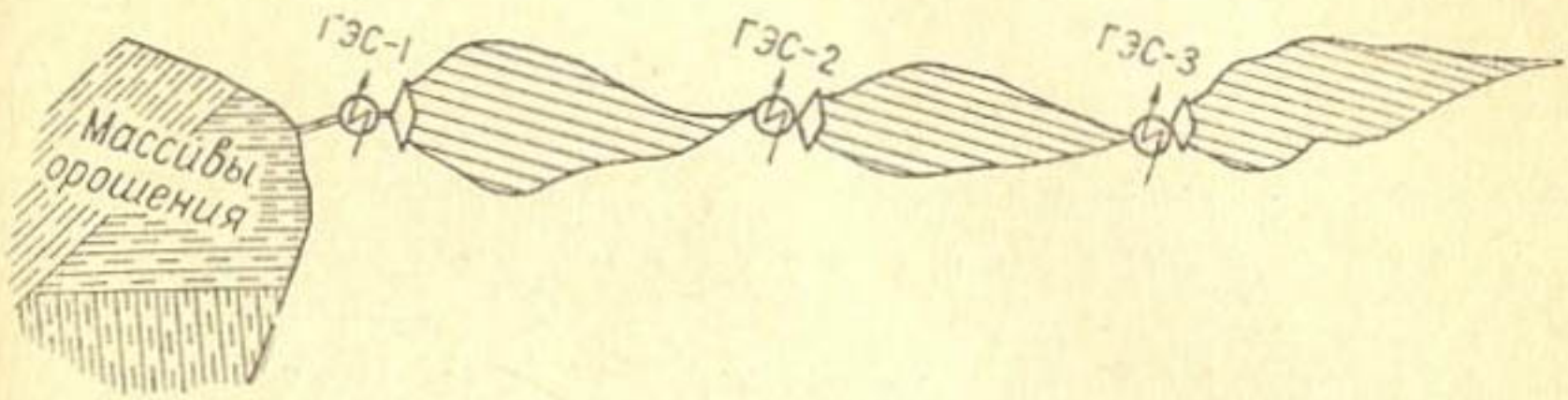


Рис. 47. Пятая расчетная схема использования ресурсов реки.

Последовательность расчетов по определению оптимальной величины рабочей мощности гидроэлектростанций каскада в случаях необходимости увязки интересов энергетики и сельского хозяйства изложим, иллюстрируя ее простейшими числовыми примерами.

Пусть требуется выбрать мощность трех гидроэлектростанций каскада (рис. 47), расчетный напор которых H_1=50 *м*; H_2=62,5 *м* и H_3=75 *м*. Полезная емкость водохранилищ—по 500 млн $м^3$. Гидроэлектростанции предназначаются для работы в пике графика нагрузки энергосистемы (рис. 14, 15, 16 и 45). Боковая приточность между гидроэлектростанциями отсутствует. Расходы воды в реке характеризуются данными табл. 9 (графа 2) и рис. 34. Орошаемые площади располагаются ниже каскада ГЭС.

В рассматриваемой схеме комплексного использования реки суммарная емкость водохранилищ (1500 млн $м^3$) позво-

ляет полностью зарегулировать сток для ирригации во все маловодные годы (50—100% обеспеченности). Следовательно, любой попуск воды в нижний бьеф ГЭС-1 в течение невегетационного периода в эти годы приведет к снижению возможностей орошения. ГЭС-2 в течение невегетационного периода сможет пропустить, не приводя к ограничениям сельского хозяйства, 500 млн $м^3$, ГЭС-3—1000 млн $м^3$. Однако величина возможного используемого объема стока ГЭС еще не определяет ее мощности. Важным фактором при этом является место каждой ГЭС в годовом графике нагрузки энергосистемы. Чем ниже располагается ГЭС в графике нагрузки, тем меньшей будет целесообразная величина ее рабочей мощности при том же потреблении воды. Выбор оптимального расположения ГЭС в графике нагрузки (оптимального числа часов использования ее мощности) в течение напряженного для гидроэнергетики невегетационного периода года является при комплексном ирригационно-энергетическом использовании реки важной технико-экономической задачей. Решение этой задачи

Выработка энергии ГЭС-2 (млн *квт.ч*)

Рабочая мощность ГЭС-2 тыс. *квт*	Период вегетации						
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
100	—	—	—	—	—	0,72	3,7
	—	—	—	—	—	5,2	26,6
200	2,88	—	—	0,74	1,48	7,2	18,5
	20,8	—	—	5,3	10,7	52,8	133,0
300	14,4	1,48	2,88	7,4	7,4	22,3	41,5
	104,0	10,7	20,8	53,4	53,4	160,5	298,5

Выработка энергии (млн *квт.ч*) и потребность в воде (млн $м^3$) ГЭС-2

Месяц	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Энергия	2,6	—	—	0,67	1,33	6,5	16,7
Вода	18,8	—	—	4,9	9,8	46,5	120,5

должно быть найдено из соображений, что верхнюю, наиболее пиковую часть графика нагрузки энергосистемы в этом случае должна покрывать станция, имеющая, с одной стороны, наименьшие расчетные затраты на дополнительный киловатт развития ее рабочей мощности (с учетом вложений на передачу этого киловатта к месту потребления) и наименьшие потери энергии при регулировании стока, с другой—не приводящая к большим ущербам у смежных водопользователей, вызываемым колебаниями расходов воды и уровней в бьефах ГЭС при регулировании.

Предположим для нашего примера, что верхнюю часть пика графика нагрузки энергосистемы будет покрывать ГЭС-2, затем ниже расположится ГЭС-3 и еще ниже — ГЭС-1. Выработка энергии и потребности в воде ГЭС-2 для этого случая подсчитаны в табл. 13.

Из рис. 48, построенного по данным табл. 13, видно, что при пропуске в течение невегетационного периода года 500 млн $м^3$ воды рабочая мощность ГЭС-2 будет равна

Таблица 13

и ее потребности в воде (млн $м^3$)

Невегетационный период					За невегетационный период	Всего за год
XI	XII	I	II	III		
—	7,44	3,72	2,0	0,74	17,6	18,32
—	53,5	26,8	14,0	5,3	126,6	131,8
2,16	22,3	18,6	8,0	7,4	76,96	88,76
15,5	160,5	134,0	57,6	53,4	554,0	642,6
10,8	41,0	43,1	26,8	29,7	192,9	248,76
77,7	295,0	310,0	193,0	214,0	1388,2	1791,0

Таблица 13а

при рабочей мощности 180 тыс. *квт*

XI	XII	I	II	III	За невегетационный период	Всего за год
1,95	20,1	16,7	7,2	6,66	69,3	80,4
14,0	144,5	120,5	52,0	48,5	500,0	580,0

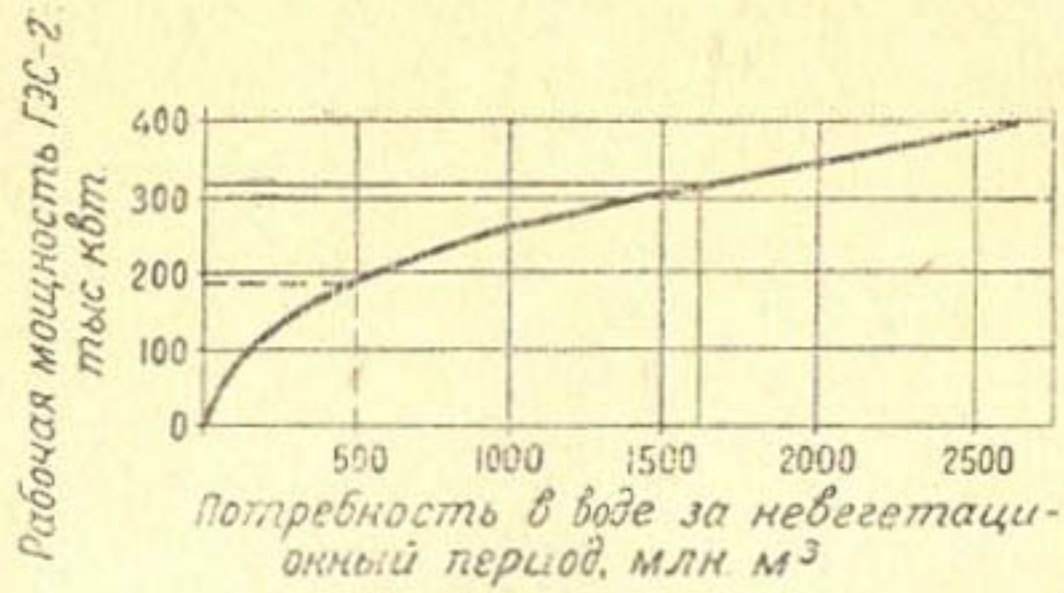


Рис. 48. Потребности в воде ГЭС-2 за невегетационный период в зависимости от ее рабочей мощности

180 тыс. *квт*. Ее выработка энергии и потребности в воде для покрытия пика графика нагрузки энергосистемы приведены в табл. 13а.

Выработка энергии ГЭС-3 (млн *квт·ч*)

Рабочая мощность ГЭС-3 тыс. *квт*	Период вегетации						
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
20	0,3	—	—	0,1	0,15	0,7	1,8
	1,8	—	—	0,6	0,9	4,2	10,8
120	11,8	1,48	2,88	6,7	6,1	15,8	24,8
	71,0	8,9	17,3	40,2	36,6	94,8	149,0
220	34,1	7,4	14,4	20,8	26,9	47,5	57,7
	204,5	44,4	86,4	125,0	161,4	285,0	346,0
320	69,4	28,2	39,6	45,3	57,2	80,0	91,6
	416,0	169,0	238,0	272,0	343,0	480,0	550,0

Выработка энергии (млн *квт.ч*) и потребность в воде (млн *м*³) ГЭС-3 при

Месяц	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Энергия	17,4	3,0	5,8	10,2	11,3	23,6	33,1
Вода	104,0	18,0	35,0	61,0	68,8	141,0	198,0

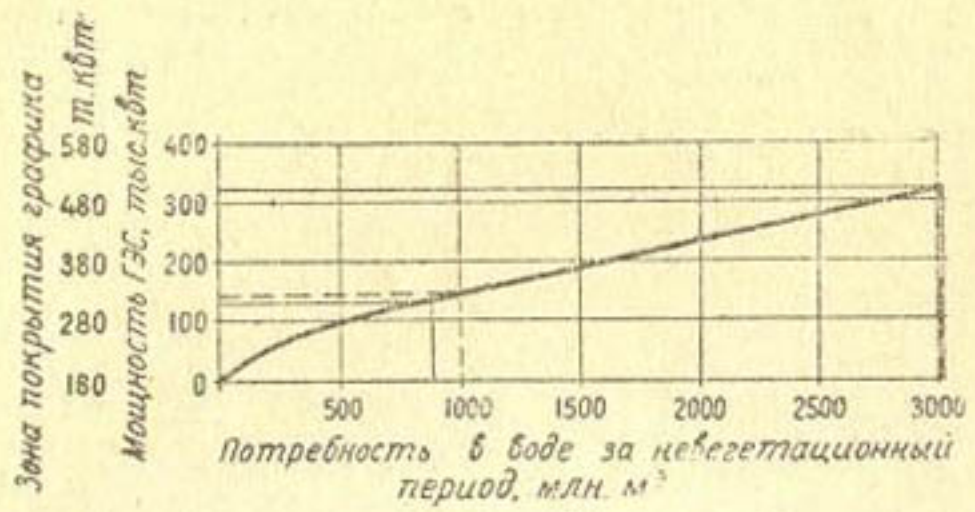


Рис. 49. Потребности в воде ГЭС-3 за невегетационный период в зависимости от ее мощности.

ГЭС-3, располагаясь в графике нагрузки энергосистемы сразу ниже ГЭС-2, будет иметь потребности в воде, приведенные в табл. 14.

Таблица 14

и ее потребности в воде (млн $м^3$)

Невегетационный период					За невегетационный период	Всего за год
XI	XII	I	II	III		
0,2	2,2	1,9	0,8	0.75	7,66	8,9
1,2	13,2	11,4	4,8	4,5	45,9	53,4
8,85	20,9	26,4	19,6	23,05	123,6	168,36
53,0	125,0	158,0	117,5	138,2	741,0	1010,0
34,1	46,9	61,3	47,8	51,3	299,1	450,2
205,0	282,0	368,0	286,0	308,0	1795,0	2702,0
55,5	83,9	100,8	83,3	86,8	502,0	821,6
333,0	504,0	605,0	500,0	520,0	3012,0	4930,0

Таблица 14а

рабочей мощности 145 тыс. *квт*

XI	XII	I	II	III	За невегетационный период	Всего за год
13,8	27,4	35,1	27,1	30,6	167,0	238,3
82,0	165,0	210,0	162,0	183,0	1000,0	1427,0

Из рис. 49 видно, что при пропуске в течение невегетационного периода года 1000 млн $м^3$ воды рабочая мощность ГЭС-3 будет равна ~145 тыс. *квт*. Ее выработка энергии и потребности в воде показаны в табл. 14а.

Далее решение примера рассмотрим в двух вариантах:

I. Путем графического определения минимума суммарных среднегодовых расчетных затрат по энергосистеме и сельскому хозяйству. При этом предположим, что в энергосистеме практически нет возможностей использования сезонной выработки энергии ГЭС и поэтому дублирование мощностей в ней заведомо неэффективно. Установленная мощность ГЭС каскада будет равна рабочей.

II. Путем аналитического решения той же задачи, но исходя из предположения, что в энергосистеме имеются полные возможности принять сезонную выработку энергии ГЭС. Целесообразность дублирования мощностей ГЭС в этом случае требует доказательства.

I в а р и а н т. При годовом стоке реки 99,9% обеспеченности равном 3238 млн $м^3$ по воде имеются возможности увеличения мощности гидроэлектростанций, но уже с ограничением орошения. Дополнительная суммарная мощность гидроэлектростанций каскада потребует дополнительного специального попуска воды (см. табл. 15).

Дополнительная выработка энергии каскада ГЭС (млн *квт·ч*) и

Дополнительная рабочая мощность каскада тыс. *квт*	Период вегетации						
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
75	16,7 40,0	4,4 10,6	8,6 20,6	10,6 25,4	15,6 37,5	23,9 57,4	24,6 59,0
175	52,0 125,0	25,2 60,5	33,8 81,2	35,2 84,3	45,9 110,0	56,4 135,0	58,5 140,5
275	89,5 215,0	56,5 135,5	69,7 167,0	78,1 187,5	85,4 205,0	99,9 240,0	110,2 264,0
375	144,0 346,0	97,0 233,0	115,2 276,0	130,1 312,0	127,4 306,0	155,9 374,0	173,2 416,0
475	207,0 496,0	154,0 370,0	162,7 390,0	179,1 435,0	177,4 425,0	207,9 498,0	233,2 560,0

На рис. 50 (кривая 1) построена сводная зависимость мощности гидроэлектростанций каскада от использования ими свободных емкостей водохранилищ и специальных попусков воды для гидроэнергетики в течение невегетационного периода года. Кривая 2 на том же рисунке представляет собой зависимость заменяемой гидроэлектростанциями мощности КЭС. Как и в рассмотренных нами выше схемах комплексного использования водных ресурсов, форма этой кривой не зависит от величины предельной мощности ГЭС. При другом конечном развитии мощности гидроэлектростанций она (кривая 2) лишь сместится параллельно самой себе. Кривая 3—зависимость средней многолетней выработки энергии гидроэлектростанций от их мощности.

Для первого варианта решения задачи предположим, что выработка энергии гидростанций каскада в течение вегетационного периода близка к выработке невегетационного периода (в графике же нагрузки она требуется несколько меньшей (см. табл. 13—15).

Мощность гидроэлектростанций каскада в пределах 325 тыс. *квт* (180 тыс. *квт* на ГЭС-2 и 145 на ГЭС-3) не приводит к ограничениям сельского хозяйства и к снижению величины орошаемых площадей. Дальнейшее увеличение мощности и специальные для этого попуски воды в течение невегета-

Таблица 15

потребности в воде (млн $м^3$)

Невегетационный период					За невегетационный период	Всего за год
XI	XII	I	II	III		
20,25	19,6	26,2	20,7	20,75	132,1	211,9
48,6	47,0	62,9	49,7	49,8	317,0	506,0
41,75	56,6	65,7	56,2	56,25	335,0	583,4
100,2	136,0	157,7	135,0	135,0	805,0	1400,0
74,25	104,6	115,3	99,7	96,35	600,4	1079,5
178,0	250,0	277,0	239,0	231,0	1439,0	2589,0
122,25	160,6	175,2	148,7	155,75	935,7	1705,3
294,0	386,0	420,0	356,0	374,0	2246,0	4093,0
179,25	223,6	247,2	213,7	220,75	1317,7	2405,8
430,0	536,0	593,0	512,0	530,0	3160,0	5770,0

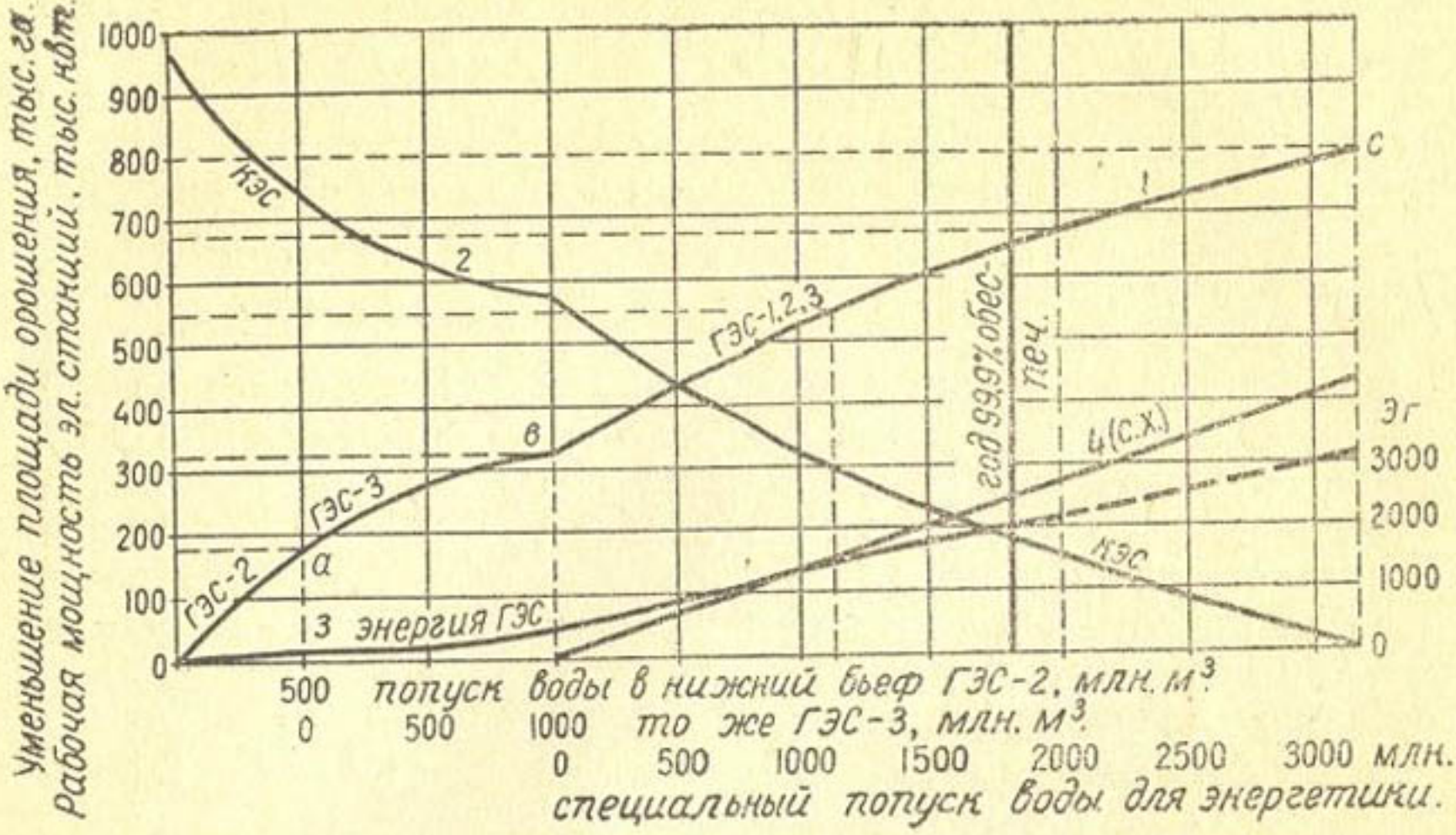


Рис. 50. Зависимости рабочей мощности 1 и средней многолетней выработки энергии *2* проектируемого каскада ГЭС, мощности заменяющей КЭС *3* и снижения величины площади орошения *4* от потребности воды ГЭС за невегетационный период года.

ционного периода приводят к уменьшению орошения. При регулировании стока уменьшение площади орошения составит $\Delta F = \frac{\Delta W}{M}$, где ΔW—специальный попуск воды на гидроэнергетику, M—оросительная норма брутто одного структурного гектара орошаемой площади. Однако в отдельных случаях, когда водохранилища могут быть использованы в качестве компенсаторов для повышения оросительной способности незарегулированных притоков ниже ГЭС (или других рек при межбассейновых связях), снижение орошения может оказаться значительно большим и будет определяться, кроме величины энергетического попуска и оросительной нормы, гидрографом незарегулированного стока и режимом водопотребления.

Выражая полученные зависимости (рис. 50) в среднегодовых расчетных затратах (рис. 51) и суммируя их, найдем оптимальное значение мощности каскада гидроэлектростанций. При этом зависимость вложений в гидроэлектростанции каскада складывается из среднегодовых расчетных затрат в ГЭС-2 (рис. 50, 51, участок о—а), ГЭС-3 (участок а—в) и затрат на прирост мощности по проектируемому каскаду в целом (участок в—с). На первых двух участках затраты опреде-

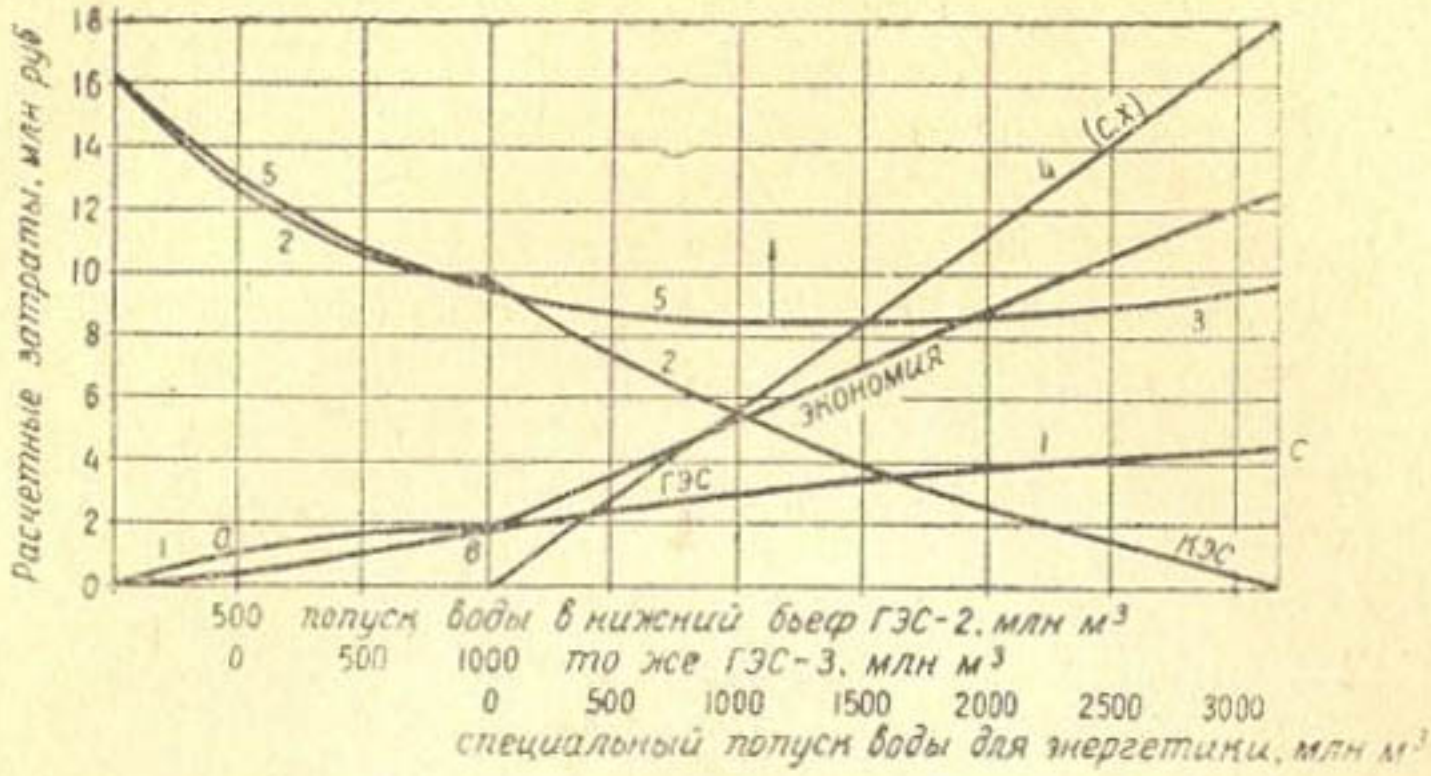


Рис. 51. Среднегодовые расчетные затраты в ГЭС *1*, сэкономленное топливо *2*, заменяющую КЭС *3* дополнительные затраты в сельское хозяйство *4* и их сумма *5* в зависимости от величины используемого гдироэлетростанциями количества воды за вегетационный период года.

ляются путем умножения удельных затрат соответствующих ГЭС на их мощность, на третьем в расчет принимаются средние расчетные затраты по каскаду, определяемые выражением (48). В нашем примере среднегодовые расчетные затраты по гидростанциям приняты равными 5,6 *руб/квт* по заменяемой КЭС—17 *руб/квт*. Стоимость вытесняемого топлива принята равной 10 *руб/тут*, удельный расход топлива 0,4 *кг/квт·ч*. Дополнительные среднегодовые расчетные затраты по сельскому хозяйству приняты 40 *руб/га*.

Как видим, зависимость суммарных среднегодовых расчетных затрат по комплексу (5 на рис. 51) представляет собой плавную кривую с весьма большой зоной минимума (изменение мощности каскада от 440 до 690 тыс. *квт* приводит к изменению суммарных затрат менее чем на 5%). Наивыгоднейшая мощность каскада равна примерно 550 тыс. *квт*. Этот же результат дает и формула для определения экономически оправдываемого числа часов использования предельного дополнительного киловатта развития рабочей мощности (46).

$$h_{э.эк.} = \frac{(a_N 3^т_N - 3^г_N)MH}{450\Delta 3_{га} - (1+\gamma)a_э\, sbMH} =$$

$$= \frac{(1.20 \cdot 17 - 5{,}6) \cdot 7000 \cdot 187{,}5}{450 \cdot 40 - 2{,}0 \cdot 1{,}06 \cdot 0{,}4 \cdot 7000 \cdot 187{,}5} = \frac{19450000}{6880} = 2830 \text{ ч.}$$

По кривой зависимости числа часов использования допол-

нительного киловатта пиковых ГЭС от их мощности в энергосистеме в течение невегетационного периода (рис. 45) видим, что этому значению $h_{э.эк}$ соответствует мощность также около 550 тыс. *квт*.

Суммарная экономически целесообразная дополнительная мощность гидроэлектростанций каскада, требующая специальных попусков воды в течение невегетационного периода года, составляет при этом 225 тыс. *квт*, специальный попуск воды — около 1120 млн. $м^3$ (см. рис. 51 и табл. 15). Общий расход воды ГЭС-3 при работе ее в графике нагрузки (без выработки сезонной энергии) за год составит около 3300 млн $м^3$ (см. табл. 14а, 15), что примерно равно годовому стоку реки 99,9% обеспеченности. Уточнения выбора величины рабочей мощности гидроэлектростанций каскада учетом возможных дефицитов энергии и их последствий в энергосистеме при этом не требуется. В других случаях этот учет может быть произведен так же, как и в примере § 5.

Распределение дополнительной мощности 225 тыс. *квт* между отдельными гидроэлектростанциями каскада должно быть сделано в соответствии с общим, принятым для данного каскада, размещением ГЭС в графике нагрузки. В нашем примере было принято, что верхнюю, наиболее пиковую часть графика занимает ГЭС-2. Из рис. 48 нетрудно найти, что при использовании в течение невегетационного периода года 500+1120=1620 млн $м^3$ воды она может обеспечить рабочую мощность в энергосистеме равную 315 тыс. *квт*. ГЭС-3, располагаясь в графике нагрузки сразу ниже и используя в течение невегетационного периода года 1000+1120=2120 млн $м^3$, сможет обеспечить 185 тыс. *квт* (см. рис. 49) и покрыть в пике графика нагрузки зону от 315 до 500 тыс. *квт*. Оставшаяся мощность — около 50 тыс. *квт*—должна будет устанавливаться на ГЭС-1.

II в а р и а н т. Для решения задачи выбора рабочей мощности гидроэлектростанций каскада с учетом использования в энергосистеме их сезонной выработки энергии необходимо определить предварительно величину установленной мощности каждой из них, оправдываемую из условия экономии топлива. Предположим при этом, что расчетная водообеспеченность орошения в нашем примере равна 75% (о ее выборе см. гл. II). Тогда оросительная способность реки в случае $N_p^{r-1}=0$ составит 852 тыс. *га*, а потребности орошения в воде (см. табл. 10а) будут (в млн. $м^3$):

I—III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X—XII	Год
—	745,6	745,6	1491,3	1491,3	745,6	745,6	—	5965

Таблица 16

Средняя многолетняя выработка энергии гидроэлектростанций при различном значении их мощности

Установленная мощность, тыс. *квт*	Пропускная способность ГЭС		Используемый сток в году 75% обеспеченности			Дополнительно можно было бы использовать воды, в многоводные годы, млн $м^3$ (3—6)	Средний многолетний используемый объем воды на выработку энергии, млн $м^3$	Средняя многолетняя выработка энергии ГЭС, млн *квт.ч* в год	Прирост средней многолетней выработки на дополнительный *квт* уст. мощности ГЭС *квт.ч*
	млн $м^3$ в месяц	млн $м^3$ в год	за период вегетации, млн $м^3$	за невегетационный период, млн $м^3$	за год млн $м^3$ (4+5)				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ГЭС-1									
0	—	—	—	—	—	—	—	—	6520
50	328,5	3940	1970	—	1970	1970	2940	326	4920
100	657	7880	3940	—	3940	3940	5150	572	1610
200	1314	15760	5610	—	5610	10140	6600	733	470
300	1971	23640	5965	—	5965	17755	7000	780	0
400	2628	31520	5965	—	5965	25555	7000	780	
ГЭС-2									
0	—	—	—	—	—	—	—	—	7550
50	262	3150	1570	500	2070	1080	2720	377	5660
100	525	6300	3150	500	3650	2650	4760	660	2100
200	1050	12600	4580	500	5082	1518	6270	870	980
300	1575	18900	5465	500	5965	12935	7000	972	0
400	2100	25200	5465	500	5965	19235	7000	972	
ГЭС-3									
0	—	—	—	—	—	—	—	—	8500
50	218	2615	1310	1000	2310	305	2540	424	6440
100	437	5320	2620	1000	3620	1610	4480	746	3890
200	574	10460	4730	1000	5730	4730	6800	1135	350
300	1311	15700	4965	1000	5965	9735	7000	1170	0
400	1748	20900	4965	1000	5965	13935	7000	1170	

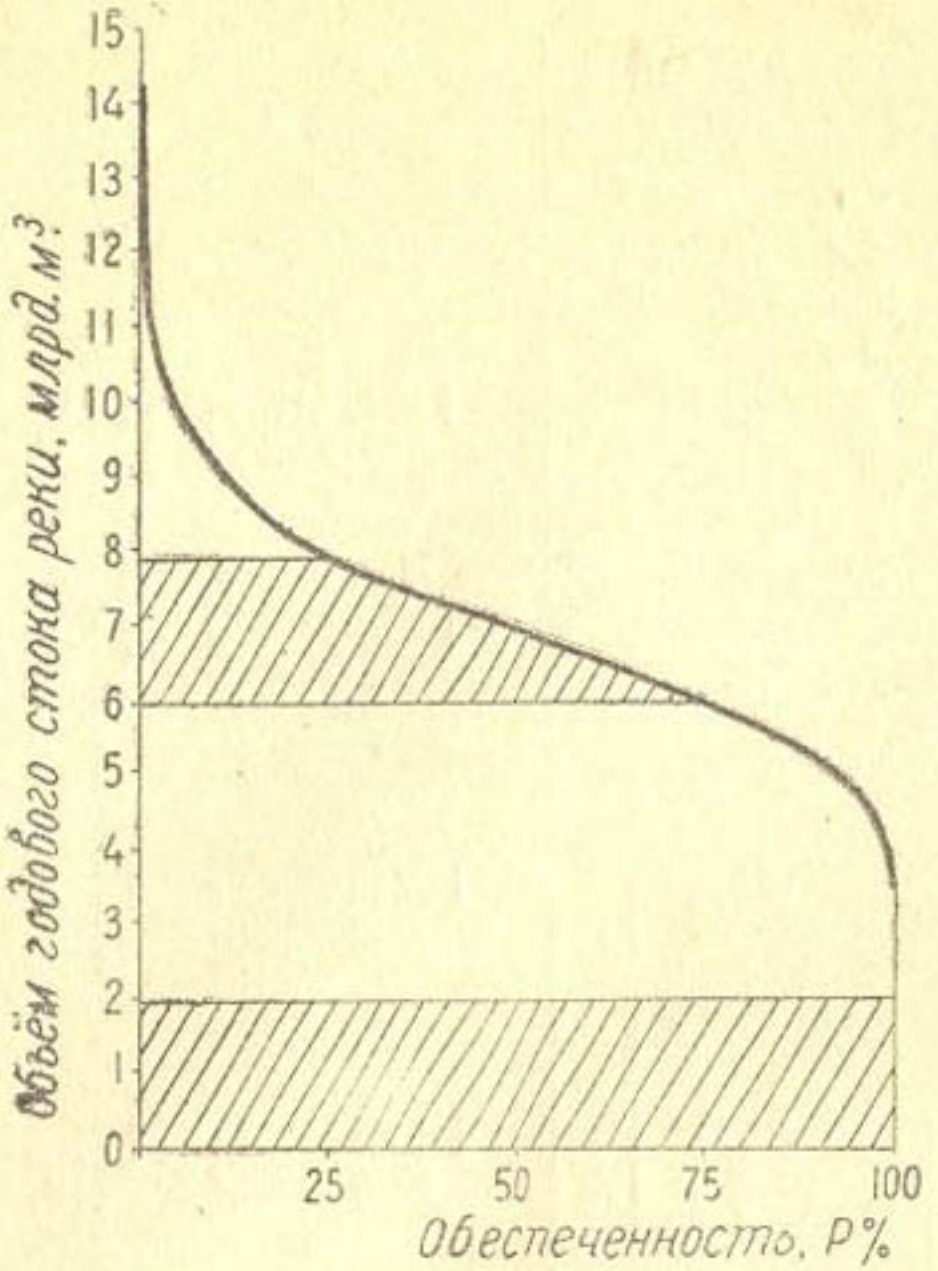


Рис. 52. Кривая обеспеченности годовых объемов стока реки в створе проектируемой ГЭС.

Подсчет средней многолетней выработки энергии гидроэлектростанций для различных значений их установленной мощности удобно свести в табл. 16.

Средний многолетний используемый ГЭС объем воды (табл. 16, графа 8) определяется из кривой обеспеченности годовых объемов бытового стока реки в створе проектируемого комплексного гидроузла. Для установленной мощности ГЭС-1 50 тыс. *квт* средний многолетний используемый сток будет равен 0,01 от суммы заштрихованных на чертеже (рис. 52) площадок, нижняя из которых характеризует собой используемый на ГЭС сток в годы 75% и более высокой обеспеченности, верхняя — во все более многоводные годы. Точно также может быть изображено потребление воды ГЭС для других значений ее установленной мощности и других ГЭС.

На рис. 53 построены зависимости прироста средней многолетней выработки энергии (числа часов использования) до-

полнительного киловатта от величины установленной мощности каждой ГЭС. Экономически оправдываемое его значение (см. формулу 42)

$$h_{эк.г} = \frac{\Delta э^{г}_{N}}{\alpha_{э} sb} = \frac{5{,}6}{1{,}06 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}4} = 1320 \text{ ч.}$$

Это соответствует экономически оправдываемой из условия экономии топлива мощности ГЭС-1, равной 170 тыс. *квт*; ГЭС-2—220 тыс. и ГЭС-3—210 тыс. *квт*. Суммарная, экономически оправдываемая мощность каскада равна 600 тыс. *квт*. Если принять условно всю эту мощность рабочей, то 600-тысячный киловатт должен будет работать на специально пропускаемой для гидроэнергетики воде в течение невегетацион-



Рис. 53. Засисимости прироста средней многолетней выработки энергии дополнительного киловатта от установленной мощности ГЭС—1, 2, 3.

ного периода года $h_{э.топл} = 3100$ *ч* (см. рис. 45), а экономически оправдывается при $N^{г}_{р} < N^{г}_{у}$ (см. 45) не более

$$h_{э.эк} = \frac{\alpha_{э}\ э^{г}N}{450 \Delta з_{га}} = \frac{1{,}2 \cdot 17{,}0 \cdot 182{,}5 \cdot 7000}{450 \cdot 40} = 1450 \text{ ч.}$$

$h_{э.эк} < h_{э.топл.}$ Следовательно, рабочая мощность ГЭС каскада будет меньше установленной (равной 600 тыс. *квт*), определяемой из условия экономии топлива в энергосистеме. Экономически оправдываемому числу часов использования дополнительного киловатта рабочей мощности на специально пропускаемой воде, равному 1450, соответствует мощность каскада 320 тыс. *квт* (рис. 45).

Из рис. 48 и49 мы видели, что рабочая мощность ГЭС-2 и ГЭС-3, составляющая в сумме 325 тыс. *квт*, не приводит к ущербам в сельском хозяйстве. Увеличение рабочей мощности в каскаде с 320 до 325 тыс. *квт* не потребует и дополнитель-

ных вложений в ГЭС. Окончательно в качестве рабочей мощности каскада должна быть принята большая из них. Итак, специальные попуски воды для гидроэнергетики, приводящие к ограничениям сельского хозяйства, в данном случае экономически нецелесообразны; рабочая мощность 325 тыс. *квт* устанавливается только на ГЭС-2 (180 тыс. *квт*) и на ГЭС-3 (145 тыс. *квт*).

Этот вывод легко проверить . Допустим, что мы уменьшим орошаемую площадь на 1 *га* и требуемую для него воду 7000 *м*³/*год* пропустим в течение невегетационного периода через каскад ГЭС. Выработка энергии гидроэлектростанций каскада и затраты по ним при этом останутся прежними. Изменятся только вложения в заменяющую КЭС и сельское хозяйство. В сельском хозяйстве потребуются дополнительные затраты на освоение более дорогого заменяющего гектара, равные в нашем случае $\Delta з_{га}$=40 *руб*/*га*. На КЭС же будет снижение затрат за счет снижения ее установленной мощности на величину $\alpha_N \Delta N^{r}_{p}$,

где ΔN^{r}_{p} — увеличение рабочей мощности каскада ГЭС, вызванное дополнительной подачей воды ΔW= =7000 *м*³.

$$\Delta N^{r}_{p} = \frac{8 \Delta W H}{3600 \cdot h_э} = \frac{8 \cdot 7000 \cdot 182.5}{3600 \cdot 1500} = 1{,}9 \ квт,$$

где $h_э$ — число часов использования дополнительного (сверх 325 тыс. *квт*) киловатта мощности в течение невегетационного периода года, равное около 1500 (см. рис. 45). Общая экономия среднегодовых расчетных затрат на КЭС составит $\alpha_N \Delta N^{r}_{p} \cdot з^{r}_N$ =1,2·1,9·17,0= =38,6 *руб*/*год* (против 40 руб. дополнительных затрат в сельском хозяйстве).

Следовательно, попуск воды является нецелесообразным.

Сравнивая оптимальные значения рабочей мощности ГЭС каскада в рассмотренных нами вариантах, видим (точно так же как и в примерах § 5), что наличие неограниченных возможностей использования в энергосистеме сезонной выработки энергии ГЭС во II варианте, при всех прочих тех же условиях, понизило величину рабочей мощности.

§ 11. Определение экономической эффективности регулирования стока и оптимальной емкости регулирующих водохранилищ

1. При сезонном регулировании стока

Строительство водохранилищ, предназначаемых для удов-

летворения интересов нескольких отраслей народного хозяйства, является, как правило, экономически более эффективным по сравнению со строительством их для использования в целях какой-либо одной отрасли. В частности, плотины водохранилищ для регулирования стока рек, помимо основной своей задачи — создания регулирующей емкости в случаях комплексного ирригационно-энергетического их использования, обычно улучшают условия забора воды на орошение, повышают командование оросительных систем над окружающими массивами сельскохозяйственных угодий, являются одновременно водоподпорными сооружениями для гидроэнергетики. Суммарные затраты в сельское хозяйство и энергетику при этом уменьшаются. Однако в использовании емкости таких водохранилищ имеют место противоречия, обусловленные различием в режимах использования водных ресурсов отдельными участниками водохозяйственного комплекса.

Определение экономической эффективности регулирования стока в этих условиях является очень сложной задачей, решить которую представляется возможным только путем оценки и сравнения эффективности комплекса в целом при различной принятой для него емкости водохранилища. Исходным принципом определения оптимальной емкости регулирующего водохранилища и наивысшей его экономической эффективности при этом должен быть принцип достижения минимума суммарных народнохозяйственных затрат на создание планового прироста орошаемых площадей сельскохозяйственных угодий, мощности и выработки электрической энергии к расчетному уровню развития сельского хозяйства и энергетической системы в районе действия проектируемого комплексного гидроузла, который применительно к решению поставленной задачи математически может быть выражен уравнением

$$\Sigma З = з_в W + з^{г}_{N} N^{у}_{г} + \alpha_N з^{т}_{N}(N_o - N^{р}_{г}) + \alpha_э sb(Э_o - \overline{Э}_г - \overline{Э}_д) + з_{га}F + \lambda з^{зам}_{га}(F_o - F) + з^{э}_{д}\overline{Э}_д + з^{сх}_{д}\overline{F}_д = f(H_м) = min, \quad (49)$$

где $\Sigma З$ — сумма среднегодовых расчетных затрат на создание плановых приростов производительности продукции энергетической системы и сельского хозяйства, *руб/год;*

$з_в$ — удельные среднегодовые расчетные затраты по плотине и водохранилищу, отнесенные к 1 $м^3$ его емкости (W), *руб/м*^{3} в год. Могут быть выражены $з_в = k(E+n)$;

k — удельные капитальные вложения на 1 $м^3$ емкости водохранилища, *руб/м*^{3};

n — ежегодные эксплуатационные издержки по плотине и водохранилищу, выраженные в долях от единовременных капитальных вложений k;

$з^{г}_{N}$ — среднегодовые расчетные затраты на дополнительный киловатт установленной мощности проектируемой ГЭС (без затрат по плотине и водохранилищу), *руб/квт* в год;

$з^{т}_{N}$ — то же по дополняющей (заменяющей) тепловой электростанции без учета стоимости топлива;

s, b — стоимость 1 *кг* и удельный расход условного топлива в *кг/квт·ч* выработки энергии заменяющей станции;

α_{N} ; $\alpha_{э}$ — коэффициенты сопоставимости мощности и энергии проектируемой ГЭС и заменяющей станции;

N_{o}; $Э_{o}$; F_{o} — плановые приросты мощности, выработки энергосистемы и площади орошения сельскохозяйственных угодий;

$N^{у}_{г}$; $N^{р}_{г}$ — соответственно установленная и рабочая мощности проектируемой ГЭС, оптимальные при каждой отметке подпора комплексного гидроузла, *квт;*

$\overline{Э}_{г}$; $\overline{Э}_{д}$ — соответственно средняя многолетняя величина выработки энергии проектируемой ГЭС и дефицита энергии в системе, *квт·ч* в год;

F — оптимальная площадь массива орошения из проектируемого комплексного гидроузла, *га;*

$\overline{F}_{д}$ — средняя многолетняя недополиваемая площадь сельхозугодий, *га;*

$з_{га}$ — среднегодовые расчетные затраты мелиоративного и сельскохозяйственного освоения дополнительного гектара на проектируемом массиве орошения (без затрат по плотине и водохранилищу), *руб/га* в год;

$з^{зам}_{га}$ — то же по дополняющему (заменяющему) массиву (источнику) орошения;

λ — соотношение урожайности 1 *га* площади на проектируемом и дополняющем массивах орошения;

$з^{сх}_{д}$ — затраты на компенсацию ущерба от недополивов одного гектара, *руб/га* в год;

$з^{э}_{д}$ — то же по компенсации 1 *квт.ч* дефицита электроэнергии в системе, *руб квт·ч;*

$H_м$ — величина максимального напора ГЭС, соответствующая принятой подкорной отметке комплексного гидроузла, *м*.

Минимум суммарных затрат $\Sigma З$, соответствующий наивыгоднейшей подпорной отметке и емкости регулирующего водохранилища комплексного гидроузла, достигается при условии $\frac{d\Sigma З}{dH_м}=0$. Распределение водных ресурсов реки и емкости водохранилища между энергетикой и сельским хозяйством, а также мощность ГЭС, ее выработка энергии и площадь орошения должны быть при этом оптимальными.

Вопросы распределения водных ресурсов реки при комплексном ирригационно-энергетическом ее использовании и определения оптимальной мощности ГЭС для случая заданной отметки и емкости регулирующего водохранилища рассматривались нами выше в §§ 4—10, где выведены специальные уравнения для определения экономически оправдываемого числа часов использования предельного дополнительного киловатта развития рабочей мощности ГЭС при работе его на специально пропускаемой для гидроэнергетики воде (уравнения 44,45).

Там же на основе анализа ряда схем комплексного ирригационно-энергетического использования водных ресурсов рек применительно к условиям засушливых районов получен вывод, что в большинстве своем гидроэлектростанции даже при весьма благоприятных условиях для их сооружения плохо конкурируют с орошением в требованиях на воду. В районах поливного земледелия ведущим компонентом комплексов явится ирригация, а экономически оправдываемые значения величин специальных попусков воды для гидроэнергетики, приводящие к ограничениям сельского хозяйства, в большинстве случаев будут небольшими.

Это означает, что при основном заборе воды на орошение из нижнего бьефа ГЭС через нее в течение вегетационного периода года могут быть пропущены значительные расходы воды, позволяющие выработать большое количество сезонной энергии. В подобных случаях, как правило, оказывается целесообразной установка на ГЭС дополнительной дублируемой в энергосистеме мощности [18]. Наличие у ГЭС водохранилища для сезонного регулирования стока также стимулирует увеличение ее мощности для отнесения на нее функций резерва энергосистемы. Все это говорит о том, что основным расчетным уравнением для определения оптимальных попусков воды на ГЭС в течение невегетационного периода года и оптималь-

ной рабочей ее мощности при комплесном ирригационно-энергетическом использовании гидроузла является уравнение (45).

Уравнения (44) и (45) выведены с учетом экономической эффективности использования воды в гидроэнергетике и сельском хозяйстве, и получающиеся при этом зимние попуски воды для ГЭС не зависят от водности года, а следовательно, при общей их относительно небольшой величине они должны иметь максимально возможную надежность (обеспеченность). В этих условиях удельные величины среднего многолетнего прироста дефицита энергии в системе на дополнительный киловатт рабочей мощности ГЭС ($\Delta\bar{Э}_д$) будут небольшими, а расчетное выражение для определения экономически оправдываемого числа часов использования предельного дополнительного киловатта развития рабочей мощности ГЭС при работе его на специально пропускаемой для гидроэнергетики воде приближенно можно применять следующим

$$h_{э.эк.}=\frac{\alpha_N\, з^{т}_N\, МН}{450\Delta з_{га}}. \qquad (50)$$

В рассматриваемых нами условиях — при сезонном регулировании стока, комплексном ирригационно-энергетическом использовании гидроузла и основном заборе воды на орошение из нижнего бьефа ГЭС, когда величину дефицита энергии в системе ($\bar{Э}_д$) и среднюю многолетнюю недополиваемую площадь ($\bar{F}_д$) при заданной обеспеченности орошения и переменной подпорной отметке гидроузла можно считать примерно постоянными, производная

$$\frac{d\Sigma З}{dH_м}=з_в\frac{dW}{dH_м}+з^{т}_N\frac{dN^{у}_г}{dH_м}-\alpha_N з^{т}_N\frac{dN^{р}_г}{dH_м}-\alpha_э\, sb\frac{d\bar{Э}_г}{dH_м}+$$

$$+з_{га}\frac{dF}{dH_м}-\lambda з^{зам}_{га}\frac{d\bar{F}}{dH_м}=0.$$

При этом $\frac{dW}{dH_м}=П$—площадь зеркала водохранилища, соответствующая отметке подпора воды на $H_м$;

$\frac{dN^{у}_г}{dH_м}=\Delta N^{у}_г$ —прирост установленной мощности ГЭС при изменении подпорной отметки на единицу. В случае дублирования дополнительной мощности ГЭС (при $N^{у}_г > N^{р}_г$) величина этого прироста оправдывается экономией топлива в энер-

госистеме. Прирост выработки энергии ГЭС при изменении ее напора на $dH_м$ составит $d\overline{Э}_г \simeq 0{,}0022\ \overline{V} dH_м$, где $\overline{V}$ — средний многолетний сток реки, используемый на ГЭС. Установленную мощность ГЭС целесообразно увеличивать в этом случае до величины, при которой число часов использования дополнительного киловатта $h_г = \dfrac{d\overline{Э}_г}{dN^у_г}$ не станет равным экономически оправдываемому $h_{г.эк} = \dfrac{з^г_N}{\alpha_э\ sb}$ (42). Из этого условия оптимальная величина прироста установленной мощности ГЭС

$$\Delta N^у_г = \frac{dN^у_г}{dH_м} = \frac{d\overline{Э}_г}{h_{г.эк.} dH_м} = \frac{0{,}0022\,\overline{V}\alpha_э\ sb}{з^г_N}.$$

$\dfrac{dN^р_г}{dH_м} = \Delta N^р_г$ —прирост рабочей мощности и $\dfrac{d\overline{Э}_г}{dH_м} \simeq 0{,}0022\overline{V}$—

—прирост средней многолетней выработки энергии ГЭС при изменении подпорной отметки гидроузла на единицу;

$\dfrac{dF}{dH_м} = \Delta F$—прирост площади орошения.

Следовательно,

$$\frac{d\Sigma З}{dH_м} = k(E+n)П + 0{,}0022\,\overline{V}\alpha_э\ sb - \alpha_N з^г_N \Delta N^р_г - 0{,}0022\,\overline{V}\alpha_э sb +$$

$$+ з_{га}\Delta F - \lambda з^{зам}_{га}\ \Delta F = 0$$

или $$k(E+n)\,П = \alpha_N з^г_N \Delta N^р_г - \Delta F \Delta з_{га},$$

откуда

$$П_{эк} = \frac{\alpha_N з^г_N \Delta N^р_г + \Delta F \Delta з_{га}}{k(E+n)}. \qquad (51)$$

Для случаев, когда в энергосистеме нецелесообразно дублирование мощности ГЭС (при $Nу_г = N^р_г$)

$$\frac{d\Sigma З}{dH_м} = k(E+n)П + з^г_N \Delta N^р_г - \alpha_N з^г_N \Delta N^р_г - 0{,}0022\,\overline{V}\alpha_э sb +$$

$$+ З_{га}\Delta F - \lambda з^{зам}_{га}\Delta F,$$

а величина экономически оправдываемой площади зеркала водохранилища

$$П_{эк}=\frac{(\alpha_э 3^{1}_{N}-3^{1}_{N})\Delta N^{P}_{г}+00022\overline{V}\alpha_э sb+\Delta з_{га}\Delta F}{k(E+n)}. \quad (51')$$

Окончательно оптимальной подпорной отметкой гидроузла при комплексном ирригационно-энергетическом его использовании является такая отметка, при которой площадь зеркала (относительная удельная емкость, $м^3/м$ увеличения подпора) водохранилища $П$ равна экономически оправдываемой $П_{эк}$. Сезонное регулирование стока реки комплексным гидроузлом эффективно, если площадь зеркала (относительный прирост емкости) водохранилища меньше или равна экономически оправдываемой.

Следовательно, определение оптимальной подпорной отметки гидроузла может быть произведено путем подсчета (по формуле 51 или 51′) величины экономически оправдываемой площади водохранилища и сравнения ее с действительной при разных подпорных отметках, выражаемой обычно в виде топографической характеристики $П=f(\nabla)$ (рис. 54). Но так как в уравнениях (51) величины прироста рабочей мощности ГЭС $\Delta N^{P}_{г}$ и площади орошения ΔF также зависят от подпора $H_м$ и емкости W, то искомая оптимальная площадь водохранилища $П$, равная экономически оправдываемой $П_{эк}$, может быть найдена или подбором, или , что практически более удобно, путем построения на топографической характеристике проектируемого водохранилища (рис. 54) дополнительной зависимости $П_{эк}=\phi(\nabla)$, которое может быть произведено по двум-трем точкам. Пересечение зависимостей $П=f(\nabla)$ и $П_{эк}=\phi(\nabla)$ и укажет оптимальное значение подпорной отметки. Проиллюстрируем это на числовом примере.

Пусть требуется выбрать оптимальную подпорную отметку и соответствующую ей емкость водохранилища для сезонного регулирования стока реки в целях орошения и гидроэнергетики при наивыгоднейших их собственных параметрах в комплексе.

Топографические характеристики проектируемого водохранилища представлены на рис. 54.

Потери стока на фильтрацию и испарение из водохранилища будут составлять 5—6% его емкости в год.

Годовой сток реки, расчетной для орошения обеспеченности, и его внутригодовое распределение даны в табл. 18 (графа 2).

Средний многолетний сток реки в створе проектируемого

гидроузла $\overline{V}=7$ млрд $м^3$, коэффициент вариации годовых объемов стока $C_v=0{,}22$.

Удельные капитальные вложения на 1 $м^3$ дополнительной емкости водохранилища k при подпоре $H_м=100—150$ $м$ равны 0,01 *руб/м³*, ежегодные издержки эксплуатации по водохранилищу и плотине составляют примерно 2% от капитальных вложений ($n=0{,}02$).

Удельные капитальные вложения на дополнительный киловатт установленной мощности ГЭС без вложений в водохранилище и плотину $к_т=40$ *руб/квт;* соответствующие ежегодные издержки эксплуатации $c_т=1{,}6$ *руб/квт*.

Отказ от сооружения гидроэлектростанции в комплексе или уменьшение ее рабочей мощности вызывает необходимость увеличения в энергосистеме мощности тепловой конденсационной электростанции, удельные капитальные вложения по которой составляют $к_т=100$ *руб/квт*, ежегодные издержки эксплуатации (без затрат на топливо) $c_т=7$ *руб/квт*. Сто-

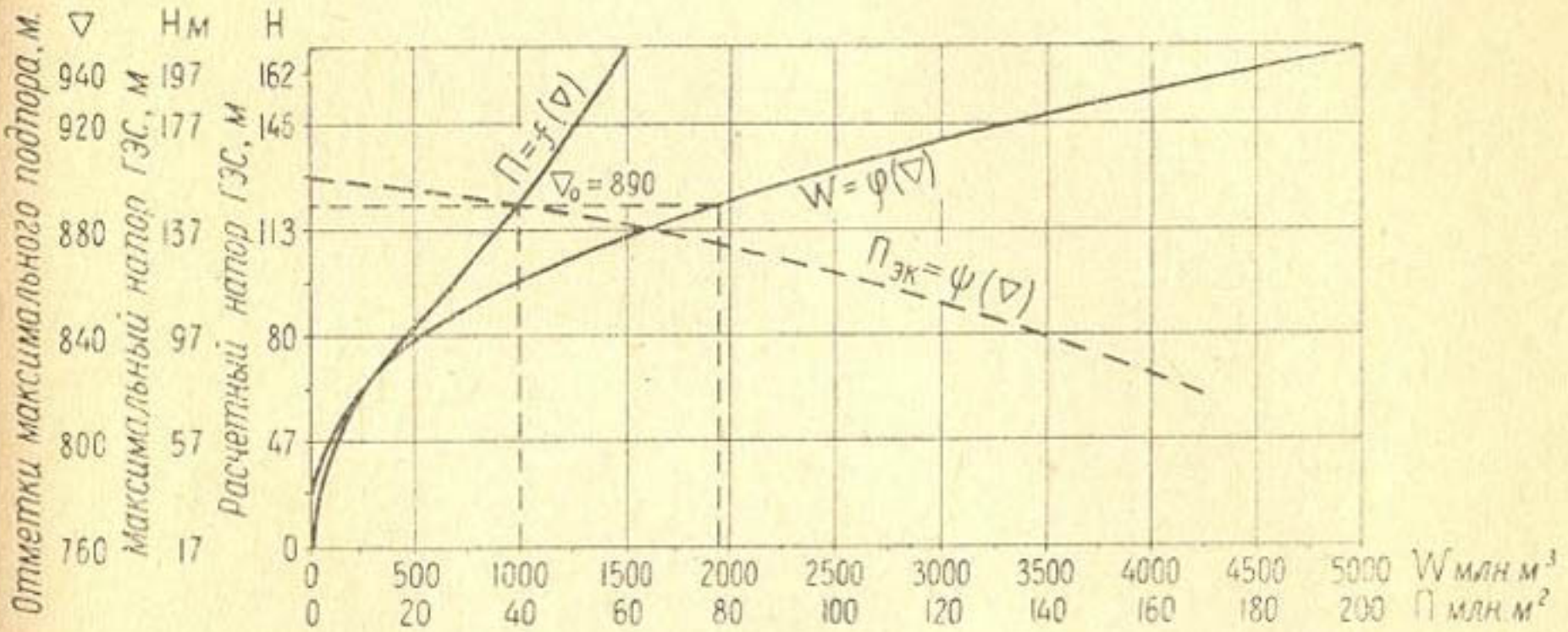


Рис. 54. Емкость W и площадь зеркала П проектируемого водохранилища сезонного регулирования стока в зависимости от отметки подпора

имость используемого ею топлива $S=10$ *руб/тут;* удельный расход $b=0{,}4$ *кг/квт·ч*.

Соотношение потребной мощности и выработки энергии на заменяющей КЭС и проектируемой ГЭС при одинаковой полезной отдаче мощности $\alpha_N=1{,}2$; энергии $\alpha_э=1{,}06$.

Забор воды на орошение проектируется из нижнего бьефа ГЭС. Удельные капиталовложения на дополнительный гектар орошения (без затрат по плотине и водохранилищу) $к_{га}=800$ *руб/га*, среднегодовые удельные издержки эксплуатации $c_{га}=50$ *руб/га*. Расчетные оросительные нормы среднего

(структурного) гектара $M=7000$ *м³/га*.

Заменяющее (дополняющее) орошение (например, регулирование и переброска стока смежной реки) требует капитальных вложений $к_{га}^{зам}=1100$ *руб/га* и ежегодных издержек эксплуатации $с_{га}^{зам}=60$ *руб/га*.

Определим оптимальные величины рабочей мощности и площади орошения для нескольких значений подпорной отметки гидроузла.

Одним из основных требований, предъявляемых к режиму использования регулируемых гидроэлектростанций в энергетических системах в гидрологических условиях расчетной обеспеченности (см. § 1), является предоставление им возможности покрытия наиболее верхней пиковой зоны суточного

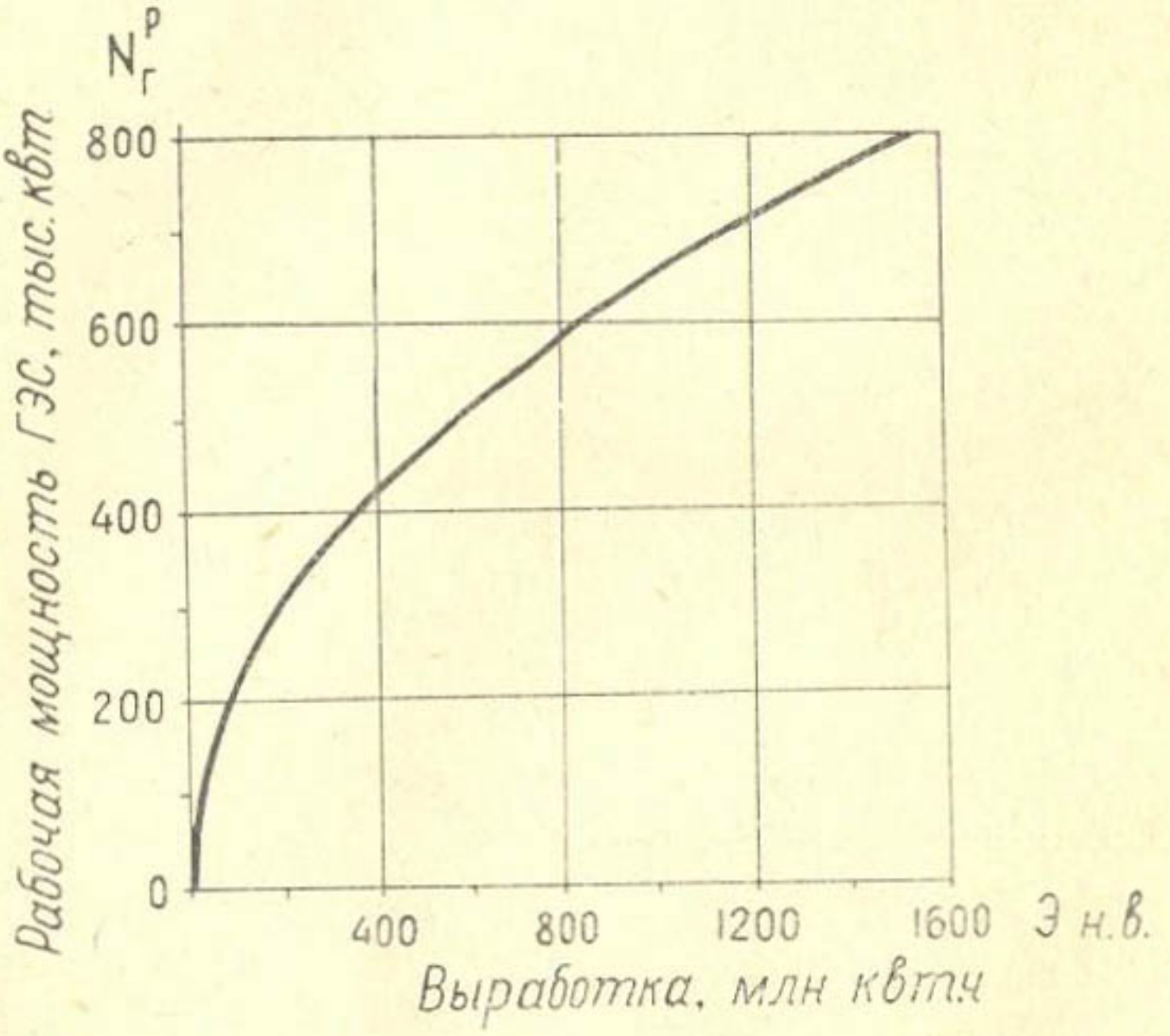


Рис. 55. Зависимость минимально необходимой выработки энергии проектируемой ГЭС в течение невегетационного периода $Э_{н.в.}$ от ее рабочей мощности $N_р^г$

графика нагрузки энергосистемы. Следовательно, задавшись любым значением величины рабочей мощности ГЭС и выбрав для нее по возможности наиболее верхнюю зону работы в гра-

фике нагрузки энергосистемы, всегда можно определить величину минимально необходимой выработки энергии ГЭС в системе в течение любого отрезка времени. В случае ирригационно-энергетического использования реки важно оценить минимально необходимую выработку энергии для покрытия потребностей энергосистемы в течение невегетационного периода года ,так как в весенне-летний период потребности ГЭС будут заведомо удовлетворены ирригационными расходами воды. При наличии зависимости минимально необходимой выработки энергии ГЭС за невегетационный период года от величины ее рабочей мощности (рис. 55) последовательность расчетов по определению оптимальной мощности и соответствующих ей попусков воды сведется к следующему:

1. К построению (по рис. 55) зависимости $h_э = f(N^р_г)$ минимально необходимого числа часов использования дополнительного киловатта в течение невегетационного периода года от мощности ГЭС (рис. 56).

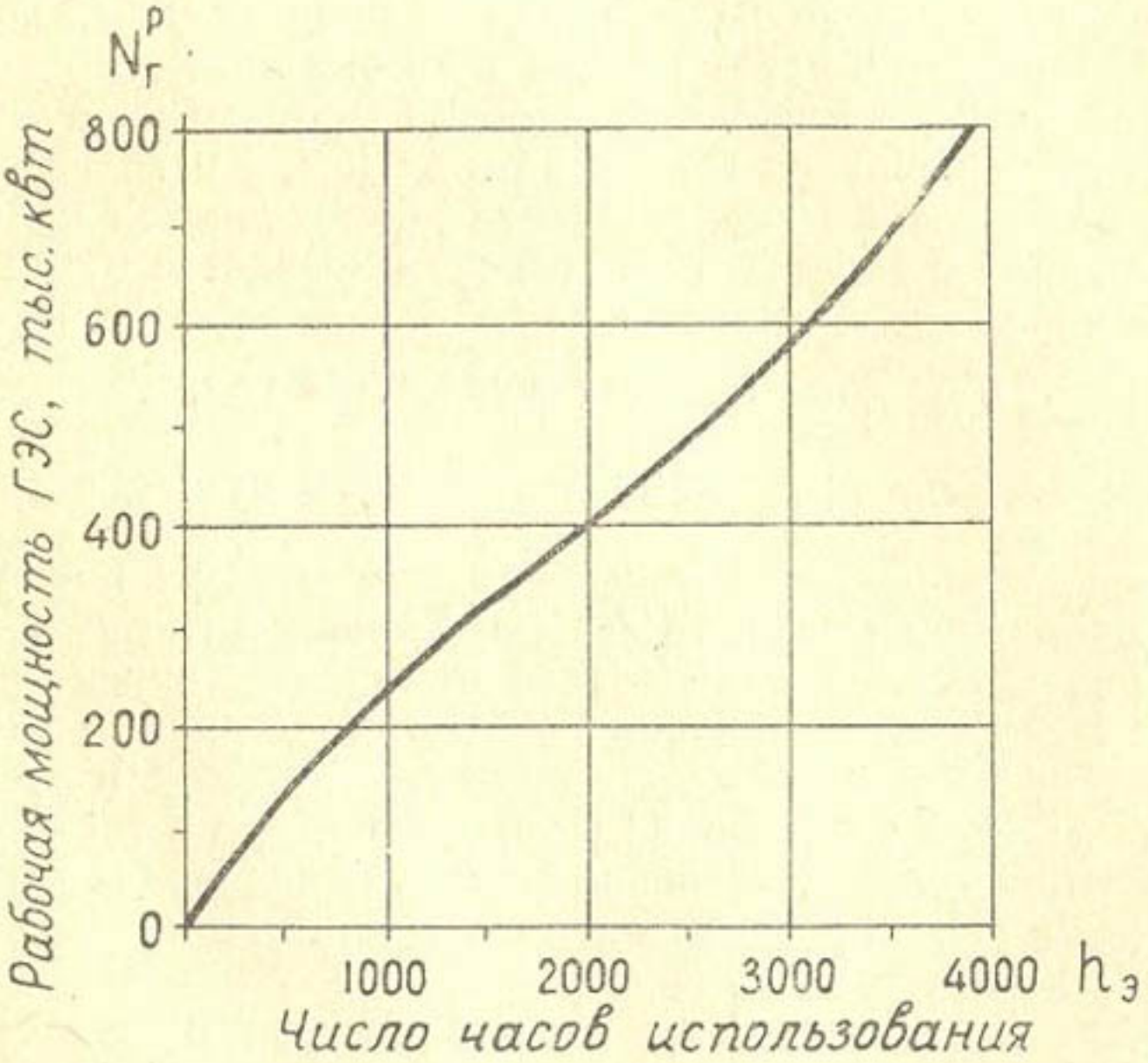


Рис. 56. Зависимость числа часов использования дополнительного киловатта проектируемой ГЭС в графике нагрузки энергосистемы за невегетационный период года $h_э$ от величины ее рабочей мощности $N^р_г$

$$h_э = \frac{\Delta Э_{н\cdot в\cdot}}{\Delta N^{р}_{г}} \quad . \tag{52}$$

2. К подсчету (по формуле 50) величины $h_{э\cdot эк}$, по которой на графике рис. 56 может быть определена допустимая величина рабочей мощности ГЭС на специальных попусках воды.

3. Оптимальная величина специального попуска воды для ГЭС в течение невегетационного периода года при этом будет

$$V_0 \approx \frac{Э^{о}_{н\cdot в\cdot}}{0{,}0022H} \quad , \tag{53}$$

где $Э^{о}_{н\cdot в\cdot}$ — минимально необходимая выработка энергии за невегетационный период года, соответствующая допустимой мощности ГЭС (см. рис. 55);

H — расчетный напор ГЭС.

Если в течение невегетационного периода расчетного для ГЭС года возможны другие (санитарные, рыбные или незарегулированные водохранилищем) расходы воды, которые будут пропускаться через ГЭС, и если они больше оптимального попуска V_0, то величину рабочей мощности ГЭС можно выбирать ориентируясь только на них (см. § 9).

При нормативном коэффициенте эффективности капитальных вложений в энергетике и сельском хозяйстве E=0,1 в нашем примере

$$з^{т}_{N} = Ек_{т} + с_{т} = 17 \ руб/квт \text{ в год},$$

$$з_{га} = Ек_{га} + с_{га} = 130 \text{ и } з^{зам}_{га} = 170 \ руб/га \text{ в год}.$$

Если урожайность на проектируемом и заменяющем орошении одинакова (λ=1), то $\Delta з_{га}$=40 *руб/га* в год.

Допустимая величина рабочей мощности проектируемой ГЭС на специальных попусках воды при различных значениях подпорной отметки комплексного гидроузла ∇ и расчетного напора ГЭС H (см. рис. 54 и 56) подсчитана в табл. 17.

Расчетная площадь орошения при этих значениях подпорной отметки ∇, полезной емкости регулирующего водохранилища W, допустимой величины рабочей мощности ГЭС на специальных попусках $N^{р}_{гд}$ и заданной его обеспеченности $p_{ор}$ может быть определена табличным способом. Подобные расчеты сделаны в табл. 18, в которой потребная в энергосистеме выработка энергии ГЭС для принятых значений ее рабочей мощности за невегетационный период расчетного года (графа 5) выписана из рис. 55; потребный для нее сток (гра-

Таблица 17

Подсчет допустимой величины рабочей мощности ГЭС

Отметка максимального подпора ∇ *м*	Максимальный напор ГЭС H_{max} *м*	Емкость водохранилища, млн $м^3$		Расчетный напор ГЭС H *м*	$h_{э.эк}$ (см. 50) *ч*	Допустимая рабочая мощность ГЭС на спец. попусках $N^{р}_{гд}$ тыс. *квт*
		полная $W_п$	полезная W			
800	57	90	70	47	373	110
840	97	490	460	80	635	167
880	137	1580	1500	113	897	218
920	177	3300	3140	146	1159	265

фа 6) определен по уравнению (53). Остальные графы расчетной таблицы особых пояснений не требуют.

Определение оптимальной величины рабочей мощности ГЭС с учетом не только специальных, но и других возможных попусков воды проведено в табл. 19.

Сток, возможный к использованию на ГЭС в течение невегетационного периода расчетного года (табл. 19, 6), определяется в данном случае вычитанием из величины бытового стока реки в этом году (1) потерь стока на фильтрацию и испарение из водохранилища (3) и потребностей орошения вегетационного периода (4). Однако величина его будет не более бытового стока за невегетационный период и не менее экономически оправдываемого специального попуска (5).

Подсчет (по формуле 51) величин экономически оправдываемой площади зеркала (относительного прироста емкости) водохранилища для принятых значений подпорной отметки гидроузла и соответствующих им оптимальных значений площади орошения, мощности и выработки энергии ГЭС приведен в табл. 20.

По данным этого подсчета на рис. 54 построена зависимость экономически оправдываемой площади зеркала водохранилища от его подпорной отметки $П_{эк}=\psi(\nabla)$. Как видно из этого рисунка, площадь зеркала водохранилища равна экономически оправдываемой (зависимости $П=f(\nabla)$ и $П_{эк}=\psi(\nabla$ пересекаются) при отметке максимального подпора комплексного гидроузла $\nabla_0=890$ *м*, которая и является оптимальной для нашего примера.

Нетрудно убедиться, что эта отметка подпора действительно является экономически наивыгоднейшей с точки зрения не

Продолжение таблицы 19

1	2	3	4	5
ный период	4202	4202	4202	4202
за невегетационный период	976	976	976	976
2. Полезная емкость водохранилища, млн. $м^3$	70	460	1500	3140
3. Годовые потери стока на испарение и фильтрацию из водохранилища, млн. $м^3$	12	28	89	187
4. Потребности орошения, млн $м^3$ (см. табл. 18)				
за вегетационный период	3192	4692	5526	5342
за невегетационный период	—	—	—	—
5. Экономически оправдываемые специальные попуски воды в течение невегетационного периода, млн $м^3$	170	255	350	436
6. Сток, возможный к использованию на ГЭС, млн. $м^3$				
за вегетационный период	4191	4692	4739	4554
за невегетационный период	975	468	350	436
7. Расчетный напор ГЭС, *м*	47	80	113	146
8. Расчетная выработка энергии ГЭС в наиболее напряженный, невегетационный период, млн *квт·ч*	101	82	87	140
9. Оптимальная рабочая мощность ГЭС, тыс. *квт* (см. рис. 55).	230	200	218	265

от подпорной отметки проектируемого гидроузла, будут изменяться в соответствии с графиком рис. 57. Подсчет суммарных затрат для построения зависимости рис. 57 при принятых выше экономических показателях проектируемого комплексного гидроузла и дополняющих объектов приведен в табл. 21.

Величины установленной мощности $N^{у}_{г}$ и соответствующие им значения средней многолетней выработки энергии ГЭС $\overline{Э}_{г}$ при различных подпорных отметках гидроузла в табл. 21 определены из условия экономии топлива на заменяющей станции с учетом принятых выше значений стоимости используе-

Таблица 20

Подсчет экономически оправдываемой площади водохранилища

∇ *м*	$Np_г$ тыс. *квт*	F тыс. *га*	$\nabla ср$ *м*	$\Delta Np_г$ *квт/м*	ΔF *га/м*	$a_N Э^т N \Delta Np_г$ *тыс руб./м*	$\Delta F \Delta З_{га}$ *тыс руб/м*	$k(E+n)$ *руб/м³*	$П_{эк}$ млн *м²*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
800	230	456,9	820	—750	+5358,0	—15,3	+214,5		+166,0
840	200	670,3	860	+375	+2975,0	+ 7,7	+119,0	0,0012	+105,5
880	218	789,3	900	+1250	—667,5	+25,5	— 26,7		— 1,0
920	265	762,9							

раметров орошения — величины оросительной нормы, площади орошения, удельных затрат орошения, сельскохозяйственного освоения и т. д. Технико-экономические показатели гидроузла и энергетики при этом могут быть оценены по укрупненным данным, исключая величину рабочей мощности ГЭС, определяющую размеры зимних попусков воды и ограничений орошения.

2. Дополнительным фактором, повышающим подпорную отметку водохранилища, может оказаться ведение им компенсирующего регулирования. Сезонное компенсирующее регулирование отличается от обычного сезонного лишь тем, что позволяет более полно использовать нерегулируемую боковую приточность реки ниже водохранилища. Следовательно, и отличие его в расчетах будет в дополнительном учете (табл. 18) возможных избытков стока с частного водосбора, которые могли бы быть использованы на орошение при условии необходимых добавок воды в критический период из водохранилища. Метод такой корректировки расходов реки применительно к расчетам регулирования стока в целях орошения подробнее описан нами в главе II.

Специальные компенсирующие попуски воды из водохранилища для гидроэнергетики могут быть обоснованы путем подстановки в приведенные выше расчетные зависимости суммарного напора гидроэлектростанций, использующих сток из проектируемого водохранилища. Эффективность такого попуска будет определяться суммарным приростом мощности и выработки энергии каскада ГЭС в наиболее напряженный для них период.

2. При многолетнем регулировании стока

Многолетнее регулирование стока рек в целях гидроэнергетики при заданной обеспеченности работы ГЭС имеет своей основной задачей получение прироста гарантированной мощности и выработки энергии. Следовательно, и эффективность такого регулирования будет определяться эффективностью этих приростов*.

---

* Здесь и ниже порядок изложения метода расчетов многолетнего регулирования стока в целях гидроэнергетики принят тот же, что и при описании метода определения экономической эффективности многолетнего регулирования стока в целях орошения с тем, чтобы нагляднее показать их идентичность (см. главу II, § 7).

При конкретном проектировании водохранилищ для многолетнего регулирования стока в целях энергетики предварительными расчетами обычно устанавливаются оптимальная обеспеченность работы ГЭС $p_г$, средний многолетний сток реки в створе проектируемого гидроузла $\overline{V}$ и вариации годовых его объемов C_v. Этих данных достаточно, чтобы, пользуясь известными в литературе графиками для расчетов многолетнего регулирования стока рек [12, 16, 22, 29, 33 и др.], определить гарантированную годовую отдачу воды α при любом принятом значении многолетней составляющей емкости водохранилища $\beta_{мн}$.

Учитывая, что многолетнее регулирование стока по сравнению с сезонным требует значительно большей полезной емкости водохранилища на каждый дополнительный кубический метр полезной отдачи воды, оно является экономически менее эффективным и должно развиваться только после полного сезонного зарегулирования стока реки в году расчетной обеспеченности $p_г$. Гарантируемая подача воды на ГЭС будет полностью использоваться на выработку гарантируемой (обеспеченной) энергии.

Гарантируемая годовая подача воды на ГЭС при многолетнем регулировании стока реки

$$V = \alpha\overline{V} - \beta\overline{V}r, \tag{54}$$

где r — годовые потери стока на фильтрацию и испарение из водохранилища, выраженные в долях от его емкости; $r = \frac{W_п}{W}$;

$W_п$ — объем годовых потерь, $м^3$;

$W = \beta V$ — общая емкость водохранилища, $м^3$;

β — коэффициент общей (сезонной плюс многолетней) емкости водохранилища;

$\overline{V}$ — средний многолетний сток реки в створе гидроузла, $м^3$.

Потребная полезная емкость водохранилища многолетнего регулирования стока реки на дополнительный 1 $м^3$ увеличения гарантируемой подачи воды ГЭС $\omega = \frac{dW}{dV}$ или, выражая в конечных приращениях,

$$\omega = \frac{\Delta W}{\Delta V} = \frac{\Delta\left(\frac{W}{\overline{V}}\right)}{\Delta\left(\frac{V}{\overline{V}}\right)} = \frac{\Delta\beta}{\Delta\left(\frac{V}{\overline{V}}\right)}.$$

Определяя $\left(\frac{V}{\overline{V}}\right)$ из (54), найдем

$$\omega = \frac{\Delta\beta}{\Delta(\alpha - \beta r)}. \qquad (55)$$

Без учета потерь стока на фильтрацию и испарение (при $r=0$)

$$\omega^0 = \frac{\Delta\beta}{\Delta\alpha}. \qquad (56)$$

Соотношения между ω и ω^0 имеют вид:

$$\omega = \frac{1}{\frac{1}{\omega^0} - r}; \qquad \omega^0 = \frac{1}{\frac{1}{\omega} + r}. \qquad (57)$$

Сравнивая полученные выражения (55), (56), (57) с выражениями для определения потребной полезной емкости водохранилища на 1 $м^3$ расчетной оросительной нормы дополнительного гектара орошения (см. гл. II, § 7), видим, что они совершенно идентичны и, следовательно, построенные по ним графики $\omega^0 = f(\beta_{мн})$ для расчетов по определению экономической эффективности и оптимальной емкости водохранилищ многолетнего регулирования в целях орошения (см. рис. 13) пригодны для тех же расчетов в гидроэнергетике. Такой же может остаться и последовательность дальнейших рассуждений в обосновании метода определения оптимальной емкости водохранилищ. Действительно, экономическая эффективность увеличения емкости водохранилища на ω для получения прироста гарантированной отдачи воды на 1 $м^3/год$ и соответствующего ему прироста мощности и выработки энергии ГЭС может быть выявлена только в сопоставлении с экономикой получения этого же прироста мощности и энергии на заменяющей электрической станции. *Увеличение емкости водохранилища, мощности и выработки энергии ГЭС при постоянной их надежности (обеспеченности) можно считать эффективным до тех пор, пока удельные суммарные затраты по водохранилищу и ГЭС на 1 м³ дополнительной гарантированной отдачи воды не сравняются с затратами на такое же увеличение по-*

лезной мощности и выработки энергии заменяющей станции.

Для увеличения гарантированной отдачи воды ГЭС на 1 *м³/год* потребуется увеличение емкости водохранилища (с учетом возможных потерь стока на фильтрацию и испарение) на ω, что приведет и к изменению напора ГЭС, который возрастет при этом на

$$\Delta H = \frac{dH}{dW}\,\omega = \frac{1}{\Pi}\,\omega, \qquad (58)$$

где Π — площадь зеркала водохранилища при напоре ГЭС, равном H.

Прирост мощности ГЭС составит

$$\Delta N_{\text{г}} = \frac{9{,}81\eta H}{3600 h_{\text{э}}} + \frac{9{,}81\eta(V+1)\Delta H}{3600\ h_{\text{э}}} \simeq \frac{0{,}0022(V\Delta H + H + \Delta H)}{h_{\text{э}}},$$

где η — к. п. д. ГЭС;

$h_{\text{э}}$ — число часов использования дополнительного киловатта мощности ГЭС в графике нагрузки энергосистемы.

Прирост средней многолетней выработки энергии ГЭС при этом будет примерно равен

$$\Delta\bar{\text{Э}}_{\text{г}} = 0{,}0022\,\bar{\text{V}}(H + \Delta H) - 0{,}0022\bar{\text{V}}H = 0{,}0022\bar{\text{V}}\Delta H.$$

Условие оптимального увеличения емкости водохранилища математически запишется в таком виде:

$$з^{\text{г}}_{\text{N}}\left[\frac{0{,}0022(\text{V}\Delta H + H + \Delta H)}{h_{\text{э}}}\right] + \omega k(E+n) =$$

$$= \alpha_{\text{N}} з^{\text{т}}_{\text{N}}\left[\frac{0{,}0022(\bar{\text{V}}\Delta H + H + \Delta H)}{h_{\text{э}}}\right] + \alpha_{\text{э}} 0{,}0022\bar{\text{V}}\Delta H sb. \qquad (59)$$

Из (59) определяем экономически оправдываемую величину прироста емкости водохранилища на 1 *м³* дополнительной гарантированной подачи воды ГЭС с учетом возможных потерь стока на фильтрацию и испарение:

$$\omega_{\text{эк}} = \frac{0{,}0022[(\text{V}\Delta H + H + \Delta H)(\alpha_{\text{N}} з^{\text{т}}_{\text{N}} - з^{\text{г}}_{\text{N}}) + \alpha_{\text{э}}\,\bar{\text{V}}\Delta H sb h_{\text{э}}]}{h_{\text{э}}\,k(E+n)}. \qquad (60)$$

Оптимальная емкость регулирующего водохранилища будет при $\omega = \omega_{\text{эк}}$ или по (57)

$$\frac{1}{\frac{1}{\omega^{\circ}}-r}=\frac{0{,}0022[(V\Delta H+H+\Delta H)(\alpha_N 3^{т}_N-3^{г}_N)+\alpha_э\bar{V}\Delta H s b h_э]}{h_э\,k(E+n)},$$

откуда

$$\omega^{\circ}_{эк}=\frac{0{,}0022[(V\Delta H+H+\Delta H)(\alpha_N 3^{т}_N-3^{г}_N)+}{h_э\,k(E+n)+0{,}0022r[(V\Delta H+H+\Delta H)(\alpha_N 3^{т}_N-3^{г}_N)+}$$

$$\frac{+\alpha_э\bar{V}\Delta H s b h_э}{+\alpha_э\bar{V}\Delta H s b h_э]}. \qquad (61)$$

Учитывая, что прирост напора $\Delta H=\frac{1}{П}\omega$ в данном случае величина очень маленькая, им, как свободным членом суммы $(V\Delta H+H+\Delta H)$, можно пренебречь, тогда

$$\omega^{\circ}_{эк}=\frac{0{,}0022[(V\Delta H+H)(\alpha_N 3^{т}_N-3^{г}_N)+}{h_э\,k(E+n)+0{,}0022r[(V\Delta H+H)(\alpha_N 3^{т}_N-3^{г}_N)+}$$

$$\frac{+\alpha_э\bar{V}\Delta H s b h_э]}{+\alpha_э\bar{V}\Delta H s b h_э]}. \qquad (62)$$

Уравнения (61) и (62) дают при этом практически одинаковые результаты.

В случае, когда установленная мощность ГЭС больше рабочей, изменение емкости водохранилища на ω приведет к тому же изменению рабочей мощности $\Delta N^{р}_{г}\simeq\frac{0{,}0022(V\Delta H+H)}{h_э}$, однако дополнительных затрат на нее при этом не потребуется; прирост средней многолетней выработки энергии составит тоже примерно $\Delta\bar{Э}_г=0{,}0022\bar{V}\Delta H$. Установленную мощность ГЭС целесообразно увеличивать в этом случае до величины, при которой число часов использования дополнительного киловатта $\overline{h_г}=\frac{\Delta\bar{Э}_г}{\Delta N^{у}_{г}}$ не станет равным экономически оправдываемому $h_{г.эк}=\frac{3^{г}_N}{\alpha_э\,sb}$. Из этого условия оптималь-

ная величина прироста установленной мощности ГЭС будет равна

$$\Delta N^{y}_{\text{г}} = \frac{\Delta \bar{Э}_{\text{г}}}{h_{\text{г.эк}}} = \frac{0{,}0022\bar{V}\Delta H \alpha_{\text{э}}\, sb}{з^{\text{г}}_{\text{N}}}.$$

Условие оптимального увеличения емкости при этом запишется следующим образом:

$$з^{\text{г}}_{\text{N}} \frac{0{,}0022\bar{V}\Delta H \alpha_{\text{э}}\, sb}{з^{\text{г}}_{\text{N}}} + \omega k(E+n) = \alpha_{\text{N}} з^{\text{т}}_{\text{N}} \frac{0{,}0022(V\Delta H+H)}{h_{\text{э}}} +$$

$$+0{,}0022\alpha_{\text{э}}\, \bar{V}\Delta H sb$$

или $$\omega k(E+n)h_{\text{э}} = 0{,}0022\alpha_{\text{N}} з^{\text{т}}_{\text{N}}(V\Delta H+H),$$

откуда

$$\omega_{\text{эк}} = \frac{0{,}0022\alpha_{\text{N}} з^{\text{т}}_{\text{N}}(V\Delta H+H)}{h_{\text{э}}\, k(E+n)},$$

а экономически оправдываемая емкость водохранилища на 1 $м^3$ дополнительной гарантированной подачи воды ГЭС, приведенная к случаю отсутствия потерь стока на фильтрацию и испарения из водохранилища,

$$\omega^{\circ}_{\text{эк}} = \frac{0{,}0022\alpha_{\text{N}} з^{\text{т}}_{\text{N}}(V\Delta H+H)}{h_{\text{э}}\, k(E+n)+0{,}0022r\alpha_{\text{N}} з^{\text{т}}_{\text{N}}(\bar{V}\Delta H+H)}. \qquad (63)$$

В случае, когда регулирующие водохранилища удалены от ГЭС и изменение их объема не приводит к изменению полезного напора ГЭС, уравнения по определению экономически оправдываемой емкости на 1 $м^3$ дополнительной гарантированной подачи воды примут вид:

при $N^{y}_{\text{г}} = N^{p}_{\text{г}}$

$$\omega^{\circ}_{\text{эк}} = \frac{0{,}0022(\alpha_{\text{N}} з^{\text{т}}_{\text{N}} - з^{\text{г}}_{\text{N}})H}{h_{\text{э}}\, k(E+n)+0{,}0022r(\alpha_{\text{N}} з^{\text{т}}_{\text{N}} - з^{\text{г}}_{\text{N}})H} \qquad (62^1)$$

и при $N^{y}_{\text{г}} > N^{p}_{\text{г}}$

$$\omega^{\circ}_{\text{эк}} = \frac{0{,}0022\alpha_{\text{N}} з^{\text{т}}_{\text{N}} H}{h_{\text{э}}\, k(E+n)+0{,}0022r\alpha_{\text{N}} з^{\text{т}}_{\text{N}} H}. \qquad (63^1)$$

В случае каскада гидроэлетростанций ниже водохранилища многолетнего регулирования стока реки в уравнения (62) и (63) должен быть подставлен напор $H_{к}$, равный сумме расчетных напоров ГЭС каскада.

Следовательно, все практические расчеты по определению экономической эффективности многолетнего регулирования стока в целях гидроэнергетики и по выбору оптимальной емкости регулирующего водохранилища могут быть сведены в данном случае к подсчету по (62) или (63) величины экономически оправдываемой емкости водохранилища на 1 $м^3$ дополнительной гарантированной подачи воды ГЭС, приведенной к случаю отсутствия потерь из водохранилища ($\omega^{\circ}_{эк}$), и к сравнению ее с потребной для этого емкостью (ω^0). Потребные емкости водохранилища без учета потерь стока на фильтрацию и испарение (ω^0) в зависимости от многолетней составляющей емкости ($\beta_{мн}$) приведены на расчетном обобщенном графике рис. 13. Многолетнее регулирование стока эффективно, если потребная емкость водохранилища меньше или равна экономически оправдываемой.

Так как в уравнениях (62) и (63) величина $\triangle H = \frac{1}{\Pi}\omega$ является функцией напора H и емкости β, то искомые оптимальные напор и емкость водохранилища, соответствующие тождеству $\omega^0 = \omega^0_{эк}$, могут быть найдены подбором или, что практически более удобно, путем построения на графиках рис. 13 дополнительной зависимости $\omega^0_{эк} = f(\beta_{мн})$, которое может быть произведено по двум-трем точкам. Покажем это на числовом примере.

Пусть требуется определить оптимальную емкость водохранилища многолетнего регулирования стока и соответствующий этой емкости напор приплотинной ГЭС при условии, что:

расчетная обеспеченность ее работы $p_г = 90\%$;

дублирование мощности в энергосистеме неэффективно и установленая мощность ГЭС равна рабочей;

средний многолетний сток реки в створе ГЭС $\bar{V} =$ 2500 млн. $м^3$;

коэффициент вариации годовых его объемов $C_v = 0{,}20$;

топографические характеристики водохранилища представлены на рис. 58;

потери стока на фильтрацию и испарение из водохранилища будут составлять примерно 2% емкости водохранилища в год ($r = 0{,}02$);

емкость водохранилища, необходимая для полного сезонного зарегулирования стока реки в году расчетной обеспеченности, $W_{сез} = 750$ млн. $м^3$ ($\beta_{сез} = 0{,}3$);

удельные капитальные вложения на дополнительный кило-

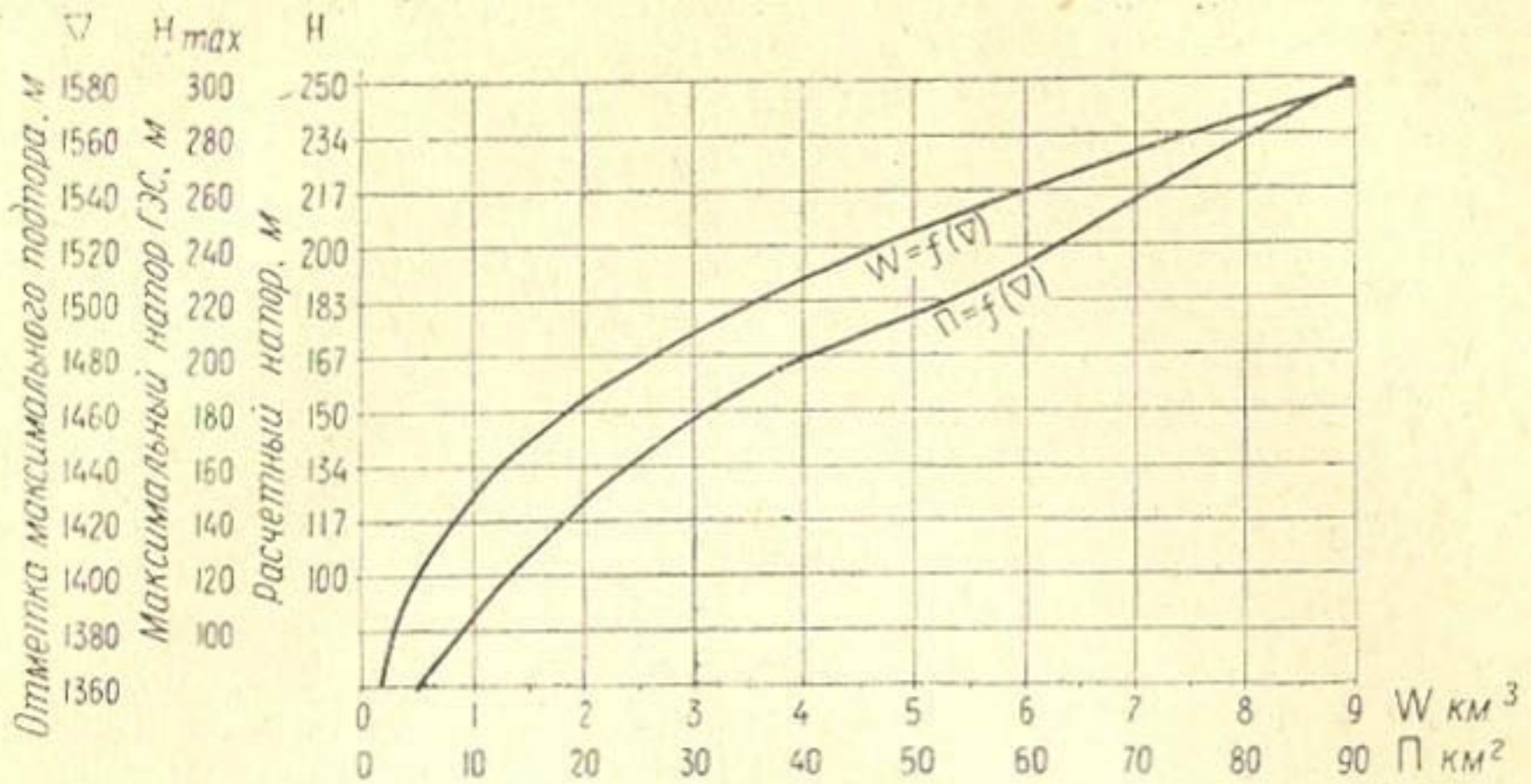


Рис. 58. Емкость W и площадь зеркала П проектируемого водохранилища многолетнего регулирования стока в зависимости от отметки подпора

ватт мощности ГЭС без вложений в водохранилище и плотину $к^т = 40$ *руб/квт*;

соответствующие ежегодные издержки эксплуатации $c_т^т = 1{,}6$ *руб/квт* в год;

удельные капитальные вложения на дополнительный метр кубический полезной емкости водохранилища при высоте плотины $H = 150—200$ *м* $k = 0{,}01$ *руб/м*³;

ежегодные издержки эксплуатации по водохранилищу и плотине составляют примерно 1,0% от капитальных вложений в них ($n = 0{,}01$);

число часов использования дополнительного киловатта мощности ГЭС в графике нагрузки энергосистемы должно быть не менее $h_э = 5000$ *ч* в год (при работе ГЭС в пике графика нагрузки число часов использования ее установленной мощности в расчетном году будет около 2500);

заменяющая станция дорогая: с удельными капитальными вложениями на киловатт мощности $к_т = 100$ руб. и ежегодными издержками (без затрат на топливо) $c_т = 7$ *руб/квт*.

стоимость используемого ею топлива $S = 10$ *руб/тут*;

удельный его расход $b = 0{,}4$ *кг/квт·ч*;

коэффициенты сопоставимости полезной мощности и выработки энергии проектируемой ГЭС и заменяющей станции $\alpha_N = 1{,}2$; $\alpha_э = 1{,}06$;

нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений $E = 0{,}1$.

При подпорной отметке водохранилища 1440 *м* (максимальный напор ГЭС $H_{max}=160$ *м*) полная емкость водохранилища (см. рис. 58) составит $W_п=1{,}25$ млрд. $м^3$ ($\beta=0{,}5$). Из них (при понижении напора ГЭС не более чем на $0{,}4\,H_т$) 0,25 млрд $м^3$ будет мертвым объемом, 0,75 млрд $м^3$— емкость для сезонного регулирования стока и только 0,25 млрд $м^3$ останется для многолетнего регулирования ($\beta_{мн}=0{,}1$).

Гарантируемая годовая подача воды ГЭС при этом составит (см. формулу 54) $V=0{,}81\cdot2{,}5\cdot10^9-0{,}5\cdot2{,}5\cdot10^9\cdot0{,}02=2{,}0\cdot10^9\ м^3$.

Коэффициент зарегулированной отдачи α определяли по графикам И. В. Гуглия [12].

При $\beta_{мн}=0{,}1$ и $C_v=0{,}2$ потребная емкость водохранилища для увеличения гарантированной подачи воды ГЭС на 1 $м^3/год$ без учета потерь стока на фильтрацию и испарение составит $\omega^\circ=1{,}75\ м^3$ (см. рис. 13), а с учетом потерь (см. уравнение 57)

$$\omega=\frac{1}{\frac{1}{1{,}75}-0{,}02}=1{,}82\ м^3.$$

Максимальный напор ГЭС возрастет при этом (см. 58) на

$$\Delta H_{max}=\frac{1{,}82}{24\cdot10^6}=0{,}076\cdot10^{-6}\ м,$$

расчетный — на $\Delta H=$

$$=\frac{H}{H_{мах}}\Delta H_{мах}=\frac{134}{160}\cdot 0{,}076\cdot10^{-6}=0{,}064\cdot10^{-6}\ м$$ (см. рис. 58).

Экономически оправдываемая емкость водохранилища на 1 $м^3$ дополнительной гарантированной подачи воды ГЭС составит при этом (см. 62)

$$\omega^\circ_{эк}=\frac{0{,}0022[(2\cdot10^9\cdot0{,}064\cdot10^{-6}+134)(1{,}2\cdot17-5{,}6)+}{5000\cdot0{,}01\cdot(0{,}1+0{,}01)+0{,}0022\cdot0{,}02\cdot[(2\cdot10^9\cdot0{,}064\cdot}$$

$$\frac{+1{,}06\cdot2{,}5\cdot10^9\cdot0{,}64\cdot10^{-6}\cdot0{,}01\cdot0{,}4\cdot}{10^{-6}+134)(1{,}2\cdot17-5{,}6)+1{,}06\cdot2{,}5\cdot10^9\cdot0{,}064\cdot10^{-6}\cdot0{,}01\cdot}$$

$$\frac{\cdot5000}{0{,}4\cdot5000]}=2{,}74.$$

При подпорной отметке 1460 *м* $H_{max}=180$ *м*; $H=150$ *м*; $W_п=1{,}85$ млрд $м^3$; $\beta=0{,}74$; $\beta_{мн}=0{,}288$; $V=2{,}2$ млрд $м^3$;

$$\omega^{\circ}=3{,}1\ м^3;\ \omega=3{,}3\ м^3;\ \Delta H_{max}=\frac{3{,}3}{31\cdot 10^6}=0{,}106\cdot 10^{-6}\ м;$$

$$\Delta H=\frac{150}{180}\cdot 0{,}106\cdot 10^{-6}=0{,}088\cdot 10^{-6}\ м;$$

$$\omega^{\circ}_{эк}=\frac{0{,}0022[(2{,}2\cdot 10^9\cdot 0{,}088\cdot 10^{-6}+150)14{,}8+1{,}06\cdot 2{,}5\cdot 10^9\cdot}{5{,}5+0{,}0022\cdot 0{,}02\cdot[(2{,}2\cdot 10^9\cdot 0{,}088\cdot 10^{-6}+150)\cdot 14{,}8+}$$

$$\frac{\cdot\ 0{,}088\cdot 10^{-6}\cdot 20]}{+1{,}06\cdot 2{,}5\cdot 10^9\cdot 0{,}088\cdot 10^{-6}\cdot 20}=3{,}62\ м^3.$$

При переходе расчетов от одной подпорной отметки водохранилища к другой в общем случае могут измениться и удельные величины потерь стока на фильтрацию и испарение из водохранилища r, и затраты на дополнительный кубометр полезной емкости k; n, поэтому при строгом подходе к расчетам эти величины должны каждый раз уточняться. Общей закономерности в их изменении нет. Они могут и уменьшаться и увеличиваться в зависимости от конкретных геологических, топографических и других условий строительства гидроузла. В пределах исследуемых величин подпорной отметки 1440—1500 *м* в нашем примере они приняты условно постоянными.

При подпорной отметке 1480 *м* $H_{max}=200$ *м*; $H=167$ *м*; $W_{п}=2{,}6$ млрд $м^3$; $\beta=1{,}04$; $\beta_{мн}=0{,}54$; $V=2{,}32$ млрд $м^3/год$; $\omega^0=5{,}6\ м^3$; $\omega=6{,}25\ м^3$; $\Delta H_{мах}=0{,}152\cdot 10^{-6}$ *м*; $\Delta H=0{,}127\times\times 10^{-6}$ *м*; $\omega^{\circ}_{эк}=4{,}9\ м^3$.

Как видно из рис. 13, величины $\omega^{\circ}_{эк}$ и ω^0 сравниваются при $\beta_{мн}=0{,}4$; оптимальная емкость водохранилища $W_0=W_{мн}+W_{сез}+W_{м.о.}=2{,}2$ млрд $м^3$; $\beta_0=\beta_{мн}+\beta_{сез}+\beta_{м.о.}=0{,}4+0{,}3+0{,}18=0{,}88$; максимальный напор ГЭС $H_{max}=190$ *м*.

Основными факторами, повышающими экономическую эффективность многолетнего регулирования стока рек в целях гидроэнергетики при заданных условиях работы ГЭС в энергосистеме, ее структуре, экономических показателях заменяющих станций, а также гидрологических характеристиках реки и топографии проектируемого водохранилища, являются:

1) удешевление строительных работ по водохранилищу (снижение затрат на дополнительный 1 $м^3$ его полезной емкости);

2) увеличение напора, на котором будет использоваться

регулируемый сток (строительство водохранилища многолетнего регулирования для каскада ГЭС с использованием его в качестве компенсирующего регулятора).

Однако даже если увеличение полезной емкости водохранилища и ничего не стоит ($k=0$), эффективность регулирования стока не является беспредельной. В этом случае уравнения (62) и (63) дают значение удельной емкости на 1 $м^3$ дополнительной гарантированной подачи воды ГЭС $\omega_{эк}=\frac{1}{r}$, соответствующее емкости водохранилища $\beta_{мн}$, при которой наступает физический предел увеличения полезной отдачи воды $\alpha_п$ (дальнейшее увеличение емкости водохранилища вследствие увеличения потерь стока на фильтрацию и испарение из него уже приводит к уменьшению полезной отдачи).

В случае ведения водохранилищем компенсирующего многолетнего регулирования стока его оптимальная емкость может быть определена принципиально тем же методом, что и при обычном многолетнем регулировании, с использованием графиков (рис. 13) и уравнений (62) и (63). Однако для этого, точно так же как и в случае расчетов многолетнего регулирования стока в целях орошения (см. гл. II, § 7), необходимо предварительно внести коррективы в параметры контролируемого этим водохранилищем стока реки. Корректировка расходов в случае каскада из двух ступеней заключается в уменьшении естественного стока в створе нижней ступени на величину сбросов или увеличения стока в створе верхней ступени на величину возможного к использованию стока с частного водосбора. Более подробно о методах корректировки изложено в главе II (§ 7), а также в работах [3, 16].

В дальнейшем для исправленного стока находятся соответствующие ему параметры — норма и коэффициент вариации, воспользовавшись которыми можно методом, описанным выше для случая обычного регулирования, выбрать оптимальную емкость водохранилищ, ведущих многолетнее компенсирующее регулирование.

Предлагаемый здесь метод расчетов многолетнего регулирования стока для гидроэнергетики с использованием обобщенных расчетных графиков (см. рис. 13), являющийся совершенно идентичным методу тех же расчетов для орошения (см. гл. II), может быть применен и при комплексном ирригационно-энергетическом использовании гидроузла.

Как указывалось выше, в районах поливного земледелия ведущим компонентом водохозяйственных комплексов является ирригация. Специальные попуски воды для гидроэнерге-

тики, приводящие к ограничениям орошения, оправдываются лишь в очень небольших размерах. Поэтому при рассмотрении вопросов определения эффективности многолетнего регулирования стока комплексным ирригационно-энергетическим гидроузлом заведомо можно принять, что прирост гарантированной годовой отдачи воды при увеличении его подпорной отметки будет использоваться по ирригационному графику попусков воды из водохранилища. В этих условиях увеличение гарантированной годовой отдачи воды комплексным ирригационно-энергетическим гидроузлом на 1 $м^3$ при соответствующем увеличении его подпорной отметки на $\triangle H$ и емкости водохранилища на ω приведет:

1) к увеличению площади орошения на $\Delta F = \frac{1}{M}$;

2) экономии расчетных среднегодовых затрат в сельскохозяйственном производстве на $(\lambda \Delta F з_{га}^{зам} - \Delta F з_{га})$;

3) увеличению мощности и выработки энергии проектируемой ГЭС на $\Delta N_{г}^{р} = \frac{0{,}0022 V_г \Delta H}{h_э}$; $\Delta \bar{Э}_г = 0{,}0022 \bar{V} \Delta H$;

4) экономии расчетных среднегодовых затрат в энергетике на

$$\left[\frac{0{,}0022 V_г \Delta H}{h_э} (\alpha_N з^т_N - з^г_N) + 0{,}0022 \bar{V} \Delta H a_э sb \right];$$

5) дополнительным затратам по плотине и водохранилищу на

$$k(E+n)\omega,$$

где M — оросительная норма среднего (структурного) гектара прироста площади орошения, $м^3/га$ в год;

λ — соотношение урожайности 1 *га* площади на проектируемом и дополняющем массивах орошения;

$з_{га}^{зам}$ — среднегодовые расчетные затраты мелиоративного и сельскохозяйственного освоения 1 *га* площади на дополняющем массиве орошения, *руб/га* в год;

$з_{га}$ — то же дополнительного гектара на проектируемом массиве орошения (без затрат по плотине и водохранилищу);

$V_г$ — объем годового стока реки, используемый на про-

изводство гарантированной мощности и выработки энергии ГЭС, *м³/год;*

$\bar{V}$ — средний многолетний сток реки, проходящий через турбины ГЭС, *м³/год;*

$h_э$ — число часов использования дополнительного киловатта рабочей мощности ГЭС в графике нагрузки энергосистемы, *ч/год.*

Принятое увеличение гарантированной отдачи будет экономически оправдано, если суммарная экономия расчетных среднегодовых затрат в сельском хозяйстве и энергетике окажется больше или равной дополнительным затратам по плотине и водохранилищу:

$$\frac{1}{M}(\lambda з_{га}^{зам} - з_{га}) + \frac{0{,}0022 V_г \Delta H}{h_э}(\alpha_N з^т_N - з^г_N) + 0{,}0022 \bar{V} \Delta H \alpha_э sb \geqslant$$

$$\geqslant k(E+n)\omega,$$

откуда экономически оправдываемая величина емкости водохранилища, соответствующая увеличению гарантированной отдачи воды комплексным гидроузлом на 1 *м³/год,* составит

$$\omega_{к.эк.} = \frac{\lambda з_{га}^{зам} - з_{га} + 0{,}0022 \Delta H \left[\frac{V_г}{h_э}(\alpha_N з^т_N - з^г_N) + \alpha_э \bar{V} sb\right] M}{k(E+n)M},$$

а после приведения к условию отсутствия потерь стока на фильтрацию и испарение из водохранилища (см. формулу 57)

$$\omega^{\circ}_{к.эк} = \frac{\Delta з_{га} + 0{,}0022 \Delta H \left[\frac{V_г}{h_э}(\alpha_N з^т_N - з^г_N) + \alpha_э \bar{V} sb\right] M}{k(E+n)M + r\Delta з_{га} + 0{,}0022\, r \Delta H \left[\frac{V_г}{h_э}(\alpha_N з^т_N - з^г_N) + \alpha_э \bar{V} sb\right] M}. \quad (63)$$

Если установленная мощность ГЭС предполагается больше рабочей и в энергосистеме эффективно дублирование мощностей, увеличение гарантированной отдачи воды комплексным гидроузлом на 1 *м³/год* при соответствующем увеличении его подпорной отметки приведет к тем же значениям увеличения площади орошения, рабочей мощности и выработки энергии

ГЭС. Установленная мощность ГЭС должна возрасти при этом на

$$\Delta N^{y}_{\text{г}} = \frac{\Delta \overline{Э}_{\text{г}}}{h_{\text{г.эк}}} = \frac{0{,}0022\,\overline{V}\Delta H \alpha_{э}\, sb}{з^{\text{г}}_{N}} .$$

Суммарная экономия расчетных среднегодовых затрат в сельском хозяйстве и энергетике при тех же дополнительных затратах по плотине и водохранилищу в этом случае будет равна

$$\frac{1}{M}\Delta з_{га} + \alpha_{N} з^{\text{г}}_{N} \frac{0{,}0022 V_{\text{г}}\,\Delta H}{h_{э}} - \frac{0{,}0022\overline{V}\,\Delta H \alpha_{э}\, sb}{з^{\text{г}}_{N}} з^{\text{г}}_{N} +$$

$$+ 0{,}0022\overline{V}\,\Delta H \alpha_{э}\, sb = \frac{1}{M}\,\Delta з_{га} + \alpha_{N} з^{\text{г}}_{N}\,\frac{0{,}0022 V_{\text{г}}\,\Delta H}{h_{э}} .$$

Экономически оправдываемая величина емкости водохранилища на 1 $м^3$ увеличения гарантированной отдачи воды комплексным гидроузлом составит

$$\omega_{к.эк} = \frac{\Delta з_{га} + \alpha_{N} з^{\text{г}}_{N} \dfrac{0{,}0022 V_{\text{г}}\,\Delta H}{h_{э}} M}{k(E+n)M} ,$$

а после приведения к условию отсутствия потерь стока на фильтрацию и испарение из водохранилища

$$\omega^{\circ}_{к.эк.} = \frac{\Delta з_{га} + \alpha_{N} з^{\text{г}}_{N} \dfrac{0{,}0022 V_{\text{г}}\,\Delta H}{h_{э}} M}{k(E+n)M + r\left(\Delta з_{га} + \alpha_{N} з^{\text{г}}_{N} \dfrac{0{,}0022 V_{\text{г}}\,\Delta H}{h_{э}} M\right)} . \quad (64)$$

Все расчеты по определению оптимальной емкости и подпорной отметки водохранилища удобно вести при этом с помощью построения на графиках рис. 13 дополнительной зависимости $\omega^{\circ}_{к.эк.} = f(\beta_{мн})$ так же, как и при использовании водохранилища в целях только гидроэнергетики и как это иллюстрировалось в вышеприведенном числовом примере.

Итак, экономическая эффективность многолетнего регулирования стока, в том числе и компенсирующего, в целях орошения, гидроэнергетики и комплексного ирригационно-энергетического использования реки, а также оптимальная емкость и подпорная отметка водохранилищ, ведущих такое регулирование, могут быть определены путем сравнения потребной и экономически оправдываемой емкости водохранилища на

1 $м^3$ дополнительной годовой гарантированной отдачи воды гидроузлом, приведенных к случаю отсутствия потерь стока на фильтрацию и испарение. Потребная емкость водохранилища определяется при этом по обобщенным расчетным графикам рис. 13, а экономически оправдываемая — по одному из уравнений (61—64). Увеличение подпорной отметки и емкости регулирующего водохранилища экономически эффективно до тех пор, пока потребная емкость, необходимая для увеличения гарантированной годовой отдачи воды водохранилищем, будет оставаться меньшей или равной экономически оправдываемой.

ГЛАВА IV

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ПРИ ИХ ДЕФИЦИТЕ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОМПЛЕКСНОГО ИРРИГАЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

§ 1. Выбор величины площади орошения и порядок ограничения сельскохозяйственных культур в воде при ее дефиците в условиях эксплуатации оросительной системы

Приступая к рассмотрению вопросов распределения воды при ее дефиците между отдельными сельскохозяйственными потребителями, а также между сельским хозяйством и гидроэнергетикой, прежде всего следует изучить все возможные мероприятия по уменьшению вызываемого дефицитом воды ущерба. При большей заблаговременности прогноза дефицита воды таких мероприятий может быть предусмотрено больше. Подобного рода мероприятиями в сельском хозяйстве часто являются:

а) задержание снега на полях и проведение влагонакопительных поливов в течение невегетационного периода;

б) пересмотр состава культур в хозяйстве и исключение из их числа наиболее влаголюбивых;

в) переход на повышенный агрономический фон, приводящий к увеличению урожая и снижению удельного расхода воды на его единицу;

г) переход на более совершенные способы полива (от полива напуском к бороздковому поливу, поливу через междурядье, дождеванию и т. д.), имеющие лучший коэффициент использования воды;

д) разработка мероприятий по уменьшению возможных потерь воды (своевременный ремонт оросительной сети и сооружений на ней, лучшее использование воды в ночное время, уменьшение потерь на испарение с поверхности поля путем ее послеполивного взрыхления и удаления сорной растительности и др.);

е) поливы повышенными (1000—1200 $м^3/га$) нормами в период прохождения паводков;

ж) разработка соответствующих правил ограничения сельскохозяйственных культур в воде, приводящих к минимуму ущерба, и т. д.

Снегозадержанию и проведению влагонакопительных по-

ливов в течение невегетационного периода маловодного года следует уделить самое серьезное внимание, так как это повышает запас влаги в почве орошаемого массива и увеличивает весенний и летний сток выклинивающихся карасуков. Установлено, что проведение влагонакопительных поливов и вызываемое ими повышение содержания влаги в почве в период сева и раннего развития растений позволяет позже начинать вегетационные поливы и значительно увеличивает урожайность. Так, по данным Киргизской селекционной станции [44], осенний влагонакопительный полив нормой 1500 *м³/га* на сероземных почвах предгорной зоны Чуйской долины увеличивает урожай сахарной свеклы в среднем на 60 *ц/га*, яровой пшеницы — на 4,5 и люцерны (сена) — на 7 *ц/га*.

Для влагонакопительных поливов может быть использована свободная, нерегулируемая водохранилищами вода, причем это не требует особых дополнительных затрат. В поздний осенний период в хозяйствах обычно имеется большое количество свободной рабочей силы, поливы проводятся по массивам, свободным от культур, что резко повышает производительность поливальщиков, повышается и коэффициент полезного действия оросительной системы за счет уменьшения потерь стока на фильтрацию и испарение.

Пересмотр состава культур в хозяйстве и исключение из их числа наиболее влаголюбивых в дефицитные по воде годы позволит лучше использовать имеющийся земельный фонд и добиться меньших ущербов от недополива культур. Известно, например, что просо и сорго расходуют значительно меньше оросительной воды, чем пшеница. Если пшеница расходует ее 400—500 *л* на 1 *кг* сухой массы, то сорго и просо тратят всего лишь 250—300 *л* [7], т. е. примерно на 40% меньше. Сэкономленную таким образом воду можно использовать на орошение других культур. Весьма важны в этом отношении работы по созданию специальных засухоустойчивых сортов у ряда культур. Следует учесть также, что каждое растение имеет свой вегетационный период и свой период максимума потребления воды. Поэтому соответствующим подбором состава культур на массиве в маловодном году можно повысить использование воды путем увязки режима водопотребления с режимом водоисточника. Для этого на полях, орошаемых из из источников снегового питания, следует отдавать предпочтение культурам с ранним вегетационным периодом (пшенице, ячменю), требующим усиленных поливов в период таяния снега в горах.

На полях, орошаемых из источников ледникового питания, должны преобладать культуры, требующие усиленных поли-

вов летом, в период максимальных расходов в этих источниках (сахарная свекла, кукуруза и др.).

Из агротехнических мероприятий по поддержанию урожая культур в дефицитные годы очень важную роль играет применение удобрений. Так, например, для образования 1 *г* сухого вещества яровая пшеница без удобрения расходует около 500 *г* воды, а пшеница, удобренная азотом, фосфором и калием — 350 *г* [7,45], т. е. и в этом случае экономится около 30% поливной воды на единицу урожая.

Переход на более совершенные способы полива также улучшает использование воды. Существующий ныне в колхозном производстве способ полива «свободным напуском» обладает рядом недостатков: требует повышенных оросительных норм, на больших уклонах смывает почвенный слой, на малых уклонах иногда приводит к значительному подъему уровня грунтовых вод и заболачиванию. Полив по полосам для зерновых культур и по бороздам (а в особо напряженные по воде периоды и через борозду) для пропашных является в этом отношении более совершенным: он позволяет равномерно распределить воду на орошаемом массиве и уменьшить на 20—30% оросительные нормы, не вызывая при этом снижения урожайности. Переход к поливу дождеванием сэкономит еще около 20% оросительной воды на каждую единицу урожая.

Правила ограничения сельскохозяйственных культур в поливной воде в условиях наступившего ее дефицита должны отвечать требованиям достижения минимума возможного снижения урожая культур при их недополивах и вызываемого ими ущерба в хозяйстве.

Определение величины снижения урожая сельскохозяйственных культур и оценка ущерба от недодачи им воды представляют собой сложную задачу. Специфика сельского хозяйства заключается в том, что величина снижения урожая при недодаче поливной воды культуре и ущерб хозяйства, вызванный этим недополивом, будут зависеть не только от вида культуры и величины ограничения, но и от агротехники ее возделывания, фазы роста растения, при которой происходит ограничение, длительности и глубины ограничения, почвенных, климатических, гидрологических и других факторов. Так, например, при оросительной норме 5000 *м³/га* недодача 1 тыс. *м³* воды на гектар, распределенная в течение всего вегетационного периода, приведет лишь к относительно небольшому снижению урожая на нем, а недодача этого же количества воды в период развития растений погубит его. Однако общее снижение урожая культуры на массиве, а следовательно, и

ущерб в хозяйстве при таком ограничении могут оказаться иногда меньшими, чем в первом случае, ибо, засушив в самом начале вегетационного периода 1 *га* культуры, мы высвободим 5000 $м^3$ воды, которую при наличии возможностей регулирования стока можно использовать для поддержания урожая на 5—6 других гектарах массива.

Весьма важно при этом правильно выбрать и массив ограничения. Площади с неглубоким залеганием грунтовых вод даже при полном ограничении в орошении иногда смогут дать некоторые урожаи. Те же культуры на массиве с глубоким залеганием грунтовых вод погибнут, однако ранняя посушка такого массива высвободит бо́льшее количество воды (в связи со значительно бо́льшими оросительными нормами на таких массивах), что при регулировании стока позволит поддержать урожаи на других площадях. Поэтому в каждом конкретном случае должны быть выбраны свои оптимальная схема и приемы ограничения сельскохозяйственных культур, приводящие к минимуму суммарного ущерба.

Решить эту задачу должны совместно специалисты по агробиологии растений и гидромелиораторы. Подход к ее решению может быть следующий. Зависимости урожая сельскохозяйственных культур от их оросительной нормы имеют (в общем их виде) форму выпуклой кривой (рис. 59). Угол на-

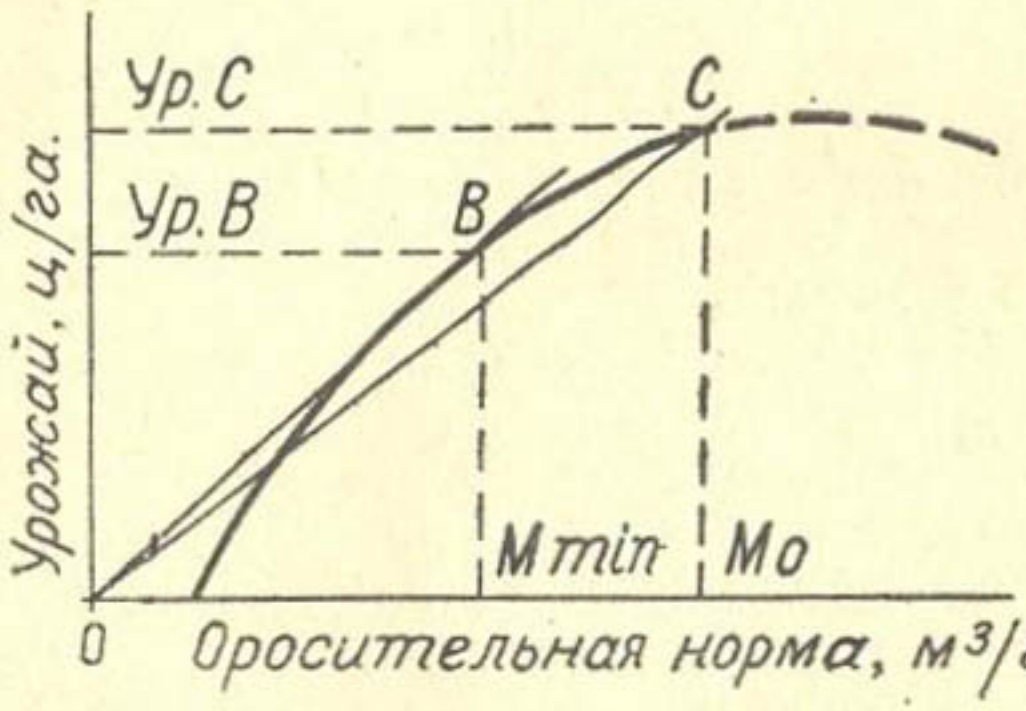


Рис. 59. К определению пределов ограничения оросительных норм.

клона любой прямой, проведенной из начала координат на эту кривую, характеризует собой удельную урожайность культуры на 1 $м^3$ оросительной нормы. Чем больше этот угол, тем выше удельная урожайность и тем лучше используется оросительная вода. Угол наклона прямой, проведенной в виде касательной (прямая ОВ), является максимальным, а ороси-

тельная норма, соответствующая точке касания (M_{min}) — наивыгоднейшей с точки зрения использования воды. Однако оптимальное значение оросительной нормы (M_0) при проектировании орошения выбирается несколько выше (точка C) в связи с тем, что даже при ограниченном количестве воды дополнительная ее подача дает прибавку урожая без дополнительных капиталовложений на освоение площади. Увеличение оросительной нормы в этом случае следует считать выгодным до тех пор, пока относительный прирост дохода на 1 $м^3$ воды (с учетом возможного ущерба от заболачивания нижележащих земель) не станет равным возможному доходу от освоения дополнительной площади.

При дефиците воды в условиях эксплуатации ирригационной системы следует стремиться использовать каждый 1 $м^3$ воды с максимальной эффективностью, что достигается поддерживанием оросительных норм равными M_{min}. Для этого при дефицитах меньших или равных $Д \leqslant F(M_0 - M_{min})$, где F — общая площадь данной культуры на массиве, следует ограничивать оросительные нормы без уменьшения площади орошения; при бо́льших дефицитах следует ограничить орошаемую в этом году площадь с тем, чтобы на ее оставшейся части поддержать оросительную норму M_{min}. Определение величины M_{min} для каждой конкретной культуры и массива не представляет затруднения, если имеется соответствующая им кривая зависимости урожая от оросительной нормы (рис. 60). Построение таких зависимостей для культур в районах возможного ограничения в воде является весьма важной задачей. Без них невозможно найти оптимальные пути ограничения, приводящие к минимальным ущербам в маловодные перебойные годы.

Выбор ограничиваемой культуры при дефиците воды в хозяйстве должен производиться с таким расчетом, чтобы достичь минимума ущерба (минимума снижения суммарного дохода). В первую очередь при этом должна ограничиваться культура, дающая наименьший доход на единицу используемой воды.

$$\Delta Д = \Delta У (Ц - С),$$

где $\Delta У = \dfrac{У_с - У_в}{M_0 - M_{min}}$ — удельное снижение урожая культуры при ограничении ее оросительной нормы на 1 $м^3$, $ц/м^3$ (см. рис. 59).

$Ц$ — государственная закупочная цена данной культуры *руб/ц*;

C — дополнительные затраты на ее получение (при заблаговременном прогнозе маловодья — ее полная себестоимость), *руб/ц*.

При больших дефицитах переходить к посушке (при заблаговременном прогнозе маловодья — к отказу от сева) на части или всей площади данной (первой) культуры следует только в том случае, если ее среднее значение удельного ущерба (соответствующее посушке, отказу от сева) будет больше или равно удельному ущербу следующей культуры при ограничениях оросительной нормы, т. е. $\Delta\overline{У}_1(Ц_1-C_1)\geqslant\Delta У_2(Ц_2-C_2)$;

$\Delta\overline{У}_1=\frac{У_{c1}}{М_{o1}}$. В противном случае следует, ограничив оросительную норму первой культуры до M_{min}, переходить к ограничению следующей.

В настоящее время уже имеется значительный материал, позволяющий построить примерные зависимости урожая культур от их оросительной нормы для некоторых районов. Так, анализ экспериментальных данных, полученных рядом исследовательских организаций*за период с 1930 г. по настоящее время, для условий Чуйской долины Киргизской ССР [5, 43, 45] дает возможность установить такие зависимости для основных культур в зоне орошения их из р. Чу, зарегулированной Орто-Токойским водохранилищем.

В качестве примера на рис. 60 приведены эти зависимости для люцерны (сена), сахарной свеклы, конопли и яровой пшеницы зоны орошения из западной ветви Большого Чуйского канала**. Как видно из рисунка, для всех культур в случаях неглубокого залегания уровня грунтовых вод в этом районе наивыгоднейшей схемой ограничения в воде является постепенное снижение их оросительных норм вплоть до нуля. На участках с более глубоким залеганием грунтовых вод удельные снижения урожайности культур при посушках получают-

---

* Киргизским научно-исследовательским институтом земледелия, Киргизской государственной селекционной станцией, Киргизской опытно-мелиоративной станцией, Институтом ботаники АН Киргиз. ССР, Кантским опорным пунктом ВНИИС; Чуйской лубяной опытной станцией, КиргизНИИЖИВом и др.

** Гидромодульный район Б-IV и Б-V. Сумма осадков 300—400 *мм/год;* глубина залегания грунтовых вод 1—3 *м*; отток грунтовых вод затруднен; почвы сероземнолуговые, тяжелосуглинистые, засоленные и слабо засоленные.

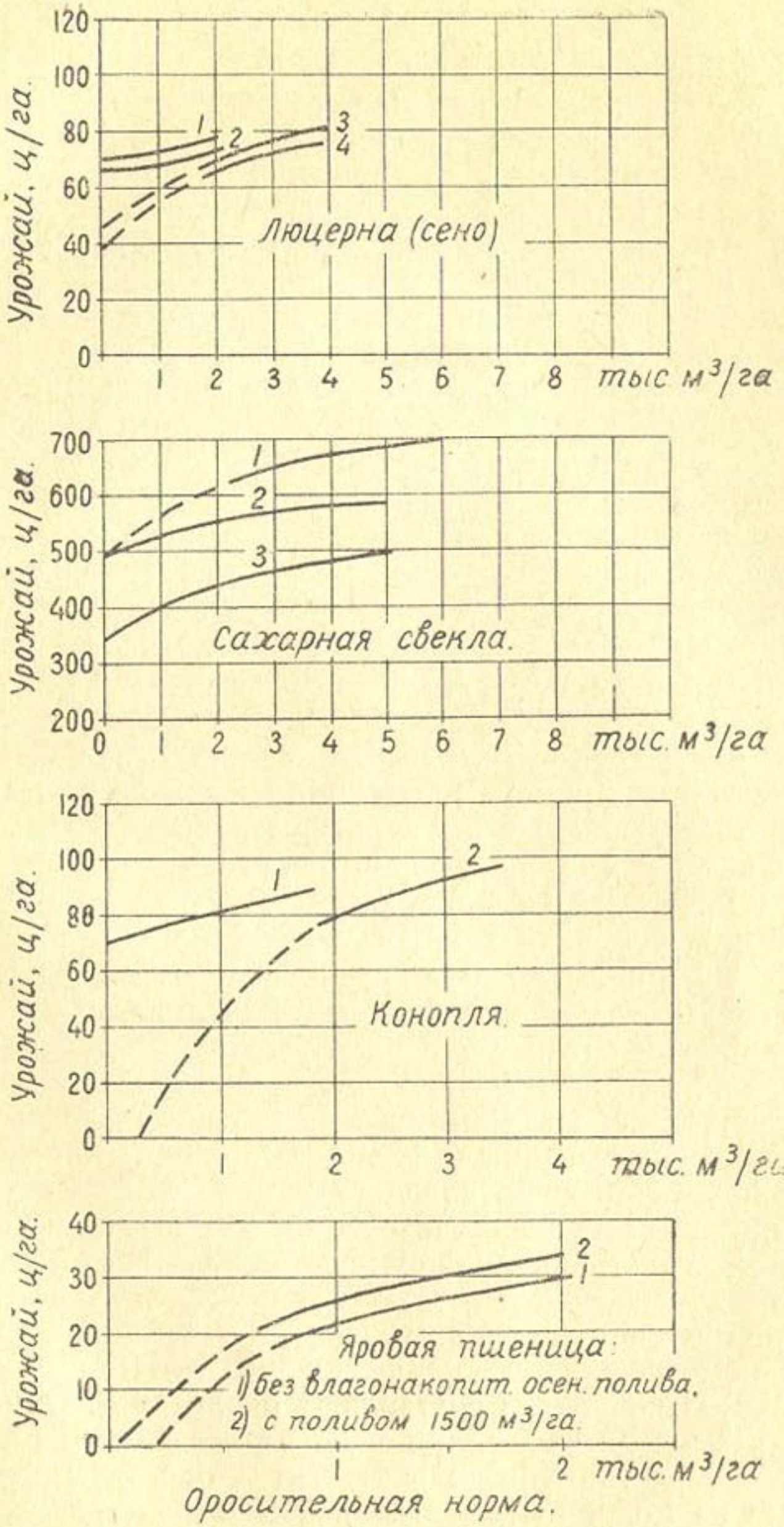


Рис. 60. Зависимости урожая от оросительной нормы.

ся примерно вдвое большими, чем при их ограничениях до M_{min}. Для случаев близкого залегания уровня грунтовых вод оросительная норма M_{min} равна нулю.

Естественно уменьшение оросительных норм с перераспределением воды в течение вегетационного периода и достижение минимальных снижений урожайности культур, приведенных здесь, практически может быть осуществлено только при наличии бассейна для регулирования стока. Отсутствие бассейна не позволяет распределить дефицит воды во времени и уменьшить его глубину в самый напряженный период. Глубокое же ограничение культур в воде даже в течение непродолжительного времени (срыв одного-двух поливов) приведет к значительно большим снижениям или даже к полной гибели урожая в зависимости от фазы развития культуры, при которой происходит ограничение и запаса влаги в почве.

В нерегулируемых ирригационных системах должны быть проведены специальные исследования по установлению величин снижения урожайности культур в зависимости от глубины и продолжительности ограничения сельхозкультур в воде в особо напряженные дефицитные периоды года, типичные для каждого источника орошения системы.

Для иллюстрации разработки правил ограничения культур в оросительной воде рассмотрим условное хозяйство. Основные возделываемые им культуры располагаются на массивах с различными почвенными и гидрологическими условиями (см. рис. 60 и табл. 22).

Средние снижения урожая культур при ограничении их оросительных норм до M_{min}, полученные из соответствующих зависимостей урожая от оросительной нормы, и имеющие место при этом средние удельные ущербы хозяйства приведены в табл. 22 (графы 3 и 6).

Культуры, используемые в качестве корма для животных, могут быть реализованы сельскохозяйственным предприятием в виде продуктов животноводства, так что необходимо выявить возможные ущербы и в этом случае.

Себестоимость продукции животноводства складывается из стоимости кормов и всех затрат на содержание и уход за животными (оплата труда работников животноводства, содержание помещений, водоснабжение и т. д.). В себестоимости мяса затраты на корм составляют около 50%. Однако, учитывая, что при уменьшении количества кормов обычно высвобождается часть работников животноводства и помещений, которые не могут быть использованы столь же эффективно,

Таблица 22

Удельные ущербы хозяйства от ограничения сельхозкультур в воде

(*коп/м*³ оросительной нормы нетто на полях)

Культура	Массив	Среднее снижение урожая при ограничении до M_{min}, *кг/м*³	Государственная закупочная цена, *коп/кг*	Себестоимость, *коп/кг*	Средний ущерб, *коп/м*³	В переводе кормовых культур на мясо	Максимальный ущерб, *коп/м*³	
							при ограничении до M_{min}	при посушках
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сено	1—4	1,0	0,5— 1,1	0,4	0,4	1,25	1,25	—
Сахарная свекла	1	3,3	2,3	1,2	3,6	—	3,6	—
	2	2,0	2,3	1,2	2,2	—	2,2	—
	3	3,0	2,3	1,2	3,3	—	3,3	—
Пшеница	1—2	0,9	6,6— 9,2	4,0	3,5	—	3,5	7,0
Конопля	1	1,1	7,7—12,0	5,0	5,3	—	5,3	—
	2	1,25	7,7—12,0	—	6,0	—	6,0	12,0
Кенаф	1	1,3	10,0—13,0	6,0	5,5	—	5,5	—
Кукуруза	1	—	—	—	3,8	7,5	7,5	15,0
В том числе								
зерно		1,0	5,5— 7,5	3,5	3,0	6,3		
стебли		2,5	0,5— 1,0	0,4	0,8	1,2		

условно можно отнести на корма 75% реализационной цены мяса.

Затраты кормов на производство 1 *кг* мяса составляют в среднем: для крупного рогатого скота — 12 кормовых единиц, для свинины — 6,4 кормовых единицы. Государственная закупочная цена на мясо изменяется от 50 до 130 коп. за 1 *кг* в зависимости от упитанности.

В табл. 22 (графа 7) подсчитаны удельные ущербы хозяйства от ограничения в оросительной воде кормовых культур с учетом возможного их перевода на мясо. Мясо принято условно средней упитанности; государственная закупочная цена его — 1 *руб/кг*, себестоимость в хозяйстве — 0,6 *руб/кг*. *В* графе 8 приведены максимальные из средних значений ущербов при ограничениях оросительных норм. В графе 9 подобным же образом подсчитаны ущербы в случае полной посушки культур.

Данные таблицы позволяют наметить и порядок ограничения культур в воде, приводящий к минимуму суммарного ущерба в хозяйстве при ее дефиците. В первую очередь в данном случае должны ограничиваться травы (сено), затем по мере увеличения общего возможного дефицита воды — сахарная свекла массива 2, сахарная свекла массива 3, яровая пшеница, сахарная свекла массива 1 и т. д. в порядке возрастания удельного ущерба на кубометр ограничения оросительной нормы. Переходить к посушке пшеницы следует только после ограничения оросительных норм до M_{min} конопли на массиве 2.

В разработанные таким образом правила ограничения сельскохозяйственных культур в оросительной воде при ее дефиците в хозяйстве иногда могут быть внесены существенные поправки:

1. За счет учета различий в к. п. д. оросительной системы на участках от водораспределителя до соответствующих культур на массивах. Если такое различие существенно, оно может быть учтено пересчетом удельных ущербов: *коп/м*^{3} оросительной нормы нетто (табл. 22, графа 8 и 9) на брутто путем умножения на к. п. д. соответствующего участка оросительной системы.

2. За счет учета неэкономических факторов. Так, если в государстве имеется необходимость сохранения, а тем более увеличения резерва какого-либо вида продукции, вырабатываемой хозяйством, задача распределения воды при ее дефиците перестает быть экономической. В этом случае сельскохозяйственная культура, дающая эту продукцию, должна стать исключением из общего правила ограничения культур в воде

и орошаться полными оросительными нормами независимо от ее доходности. Это исключение из общего правила ограничений должно быть установлено решением соответствующего государственного директивного органа.

§ 2. Оценка ущерба в сельском хозяйстве и производственно-энергетической системе* при ограничениях их в воде

Оценку ущерба от ограничения в воде как сельскохозяйственных, так и промышленных потребителей в целях последующего оптимального распределения водных ресурсов реки между ними следует вести исходя из предположения, что при проектировании комплексного водохозяйственного объекта, выборе расчетной обеспеченности работы отдельных его компонентов, планировании потребления и производства необходимого количества выпускаемой ими продукции были учтены возможные снижения их производительности в критически маловодные (перебойные) годы и предусмотрены мероприятия по ликвидации в стране или конкретном административно-хозяйственном районе расположения комплекса недостатка их продукции. При этом водноэнергетические ресурсы реки в период их дефицита должны распределяться между компонентами комплекса таким образом, чтобы добиться минимума суммарного ущерба от ограничений только на предприятиях, непосредственно использующих воду (или энергию) реки. Все последующие предприятия, потребляющие продукцию водохозяйственного комплекса, воспользуются государственными ее резервами** (или продукцией компенсирующих предприятий) и поэтому не будут иметь перебоев в работе и ущербов.

В производственно-энергетической системе, точно так же как и в сельском хозяйстве, могут быть предусмотрены свои мероприятия по уменьшению вызываемого дефицитом воды ущерба. Такими мероприятиями часто являются снижение норм потребления электроэнергии, сосредоточение ремонтов оборудования и массовых отпусков производственных рабо-

---

* В связи с тем, что гидроэлектростанции являются лишь преобразователями кинетической энергии потока воды в электрическую и не потребляет воды сами, при оценке ущерба от ограничений их следует рассматривать как промежуточное звено производственно-энергетической системы (подобно водозаборным сооружениям и каналам в сельскохозяйственной оросительной системе).

** Если резерв какого-либо вида продукции компонентов комплекса отсутствует или имеется необходимость его сохранения, а тем более увеличения, задача распределения возможного дефицита воды перестает быть экономической, и ее решение здесь не рассматривается.

чих и служащих на период дефицита воды (энергии), установление очередности и пределов ограничения потребителей энергии, обеспечивающих минимум суммарного ущерба, и т. д.

При ограничении в воде ГЭС и недовыработке ею энергии первый ущерб испытывает энергосистема, с одной стороны, менее производительно используя свой обслуживающий персонал и оборудование, с другой — повышая выработку энергии и расход топлива на тепловых электростанциях. Оценка ущерба от перерасхода топлива не представляет особых затруднений. Следует только помнить, что расход топлива на каждый дополнительный киловатт-час выработки энергии ТЭС будет значительно выше среднего. В расчет должны приниматься при этом не удельные расходы топлива, а его относительные приросты.

После того как возможные резервы повышения выработки энергии и мощности в энергосистеме будут исчерпаны, возникает необходимость ограничения электроснабжения производственных предприятий. Недодача электроэнергии предприятиям отрицательно сказывается на режиме их работы, приводит к удорожанию народнохозяйственной себестоимости продукции (главным образом, за счет трех расходов предприятия, которые не зависят от объема выпускаемой продукции), к уменьшению количества выпускаемой продукции и т. п.

Различные потребители, разумеется, по-разному реагируют на нехватку электроэнергии. У каждого предприятия имеются свои «внутренние резервы», позволяющие в известной мере снижать ущерб от ограничения. Последовательное увеличение дефицита электроэнергии приводит к использованию резервов и постепенному повышению удельного ущерба на каждый недоданный киловатт-час электроэнергии. Установить указанную закономерность изменения удельного ущерба для отдельных потребителей энергии весьма трудно, поэтому ограничимся рассмотрением средних его значений.

При снижении производительности продприятия, вызванной ограничением (отключением) электроснабжения, общие расходы (общезаводские, общецеховые) останутся на уровне, соответствующем его полной производительности. Учитывая, что при длительном ограничении предприятий в электроэнергии часть высвобождающихся производственных рабочих может быть использована на других работах, к ущербу следует отнести только часть их заработной платы.

Неверно также относить к ущербу и полные амортизационные отчисления при снижении производительности основного производственного фонда. Таким образом, при невыполне-

нии производственного плана предприятие будет иметь непроизводительные расходы

$$A=\delta_з S_з+S_{оз}+S_ц+\delta_a S_a,$$

где $S_з;S_{оз};S_ц;S_a$ — соответственно заработная плата производственных рабочих, общезаводские, цеховые расходы и амортизационные отчисления;

$\delta_з;\delta_a$ — доля зарплаты производственных рабочих и доля амортизационных отчислений, относимых к ущербу предприятия.

Разделив непроизводительные издержки предприятия A на количество недоданной ему электроэнергии $Э$ (независимо от графика и глубины ограничения, что является допущением, занижающим действительные ущербы), получим удельную величину ущерба на 1 *квт·ч* недоотпущенной электроэнергии:

$$У=\frac{A}{Э}. \qquad (65)$$

Методы определения удельного ущерба производственных предприятий от ограничения их в электроэнергии для условий проектирования производственно-энергетических систем были весьма детально разработаны ранее в трудах Ш. Ч. Чокина [46], И. Н. Теплякова [36], К. И. Шаввы, И. П. Дружинина [47] и др.

Удельные величины ущербов, подсчитанные по выражению (65), будут меньше, чем приведенные в работах [36, 46, 47], так как в уравнении (65) не учтены ущербы от уменьшения доходной части общества (отчисления на расширенное воспроизводство и нужды общества) при недовыпуске продукции. Учет этого фактора для условий эксплуатации производственно-энергетической системы вызывает ряд возражений дискуссионного характера.

Величины удельных ущербов предприятий, подсчитанные по выражению (65), не учитывают также ущербов от возможного брака продукции и сырья, что занизит действительные ущербы народного хозяйства от недовыработки энергии, а в подсчетах наивыгоднейшего распределения воды между сельским хозяйством и энергетикой приведет к ошибке в пользу сельского хозяйства. Исходя из соображения снять возможно большее число возражений со стороны работников сельского хозяйства, для оценки ущерба в промышленности от недовыработки энергии воспользуемся выражением (65), а к вопросу методики распределения дефицита воды между энергети-

кой и сельским хозяйством подойдем с позиций, заведомо более благоприятных для сельского хозяйства.

Для принятых удельных величин ущербов предприятий может быть построена зависимость суммарного ущерба производственно-энергетической системы от недовыработки энергии (ограничения в воде) ГЭС комплексного ирригационно-энергетического объекта.

В качестве примера построения такой зависимости и распределения воды между сельским хозяйством и гидроэнергетикой может быть рассмотрен комплексный ирригационно-энергетический гидроузел на р. Чу, состоящий из водохранилища сезонного регулирования, ирригационного канала для орошения около 100 тыс. *га* земель Чуйской долины и каскада ГЭС с общим напором $H_к = 75$ *м*, расположенного на сбросе из ирригационного канала и снабжающего энергией промышленных и коммунально-бытовых потребителей Фрунзенского энергоузла.

В маловодном 1961 г. общий дефицит воды за вегетационный период по гидроузлу составил 240 млн $м^3$. Отнесение этого дефицита воды полностью на каскад ГЭС приводит к недовыработке энергии каскадом — 40 млн *квт·ч*. Однако использование всех возможных резервов Фрунзенской энергосистемы позволило снизить общий дефицит электроэнергии до 22,2 млн *квт·ч*, что уменьшило дефицит воды по гидроузлу до 107 млн $м^3$. Снижение дефицита энергии в системе с 40 до 22,2 млн *квт·ч* потребовало дополнительно сжечь около 16 тыс. *т* условного топлива на сумму примерно 320 тыс. *руб*. Остающийся дефицит 22,2 млн *квт·ч* вызвал необходимость ограничения электроснабжения производственных предприятий.

Удельные ущербы от ограничения электроснабжения основных производственных предприятий Средней Азии и Казахстана приведены в работах [36, 46, 47]. В работе [47] они подсчитаны для предприятий Фрунзенской энергосистемы тремя различными методами. Наиболее точными, по нашему мнению, будут ущербы, подсчитанные по методу академика Ш. Ч. Чокина (46), при определении которых коэффициент участия заработной платы производственных рабочих в формировании ущерба $\delta_з$ и амортизационных отчислений $\delta_а$ приняты соответственно 0,5 и 0,6. Уменьшив их еще на величину отчислений на расширение воспроизводства и нужды общества $Ек$, где E — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений, $к$ — удельные капиталовложения на 1 *квт·ч* потребляемой предприятием электроэнергии, получим принимаемые нами расчетные ущербы (табл. 23).

Таблица 23

Предприятия Фрунзенской производственно-энергетической системы в порядке увеличения их удельных ущербов

Предприятия	Удельный ущерб, *коп/квт·ч*	Примерное потребление энергии за вегетационный период, млн *квт·ч*
Чуйский цемзавод	7	1,0
Мелькомбинат	8	2,0
Фрунзенский машзавод	13	1,5
Мясокомбинат	19	3,3
Пенько-джутовая фабрика	21	2,1
Кожзавод № 1	25	0,48
Пивзавод	25	0,5
Суконная фабрика	28	0,6
Сельмашзавод	29	10,3
Шампанвинкомбинат	32	0,4
Прядильно-ткацкая фабрика	35	3,2
Кожзаводы № 2 и 3	40	0,45
Гормолзавод	41	0,6
Фрунзенский ремзавод	42	1,5
Чулочная фабрика	57	0,2
Табачно-ферментационный завод	57	0,6
Деревообрабатывающий комбинат	59	1,0
Обувная фабрика	60	0,5
Трикотажная фабрика	79	0,5
Ликеро-водочный завод	84	0,1
Швейная фабрика им. ВЛКСМ	93	0,25
Завод металлоизделий	125	0,4
Фабрика «40 лет Октября»	154	0,7
Табачная фабрика	180	0,15

Каждый кубический метр воды, не доданный каскаду ГЭС, снижает его выработку энергии на 1/6 *квт·ч*. Ограничение каскада в течение вегетационного периода на 1 млн $м^3$ воды приводит к снижению выработки энергии ГЭС на 167 тыс *квт·ч* и к суммарному ущербу по производственно-энергетической системе на сумму 11800 руб. (при условии отнесения всего дефицита энергии на Чуйский цементный завод, имеющий наименьший удельный ущерб от ограничения его в электроэнергии). При бóльшем ограничении каскада ГЭС в воде и увеличении дефицита энергии в системе может потребоваться полная остановка цементного завода и ряда других предприятий, имеющих последовательно большие удельные ущербы (мелькомбинат, машзавод и др.).

На рис. 61 (кривая 1) показана зависимость суммарного ущерба во Фрунзенской производственно-энергетической сис-

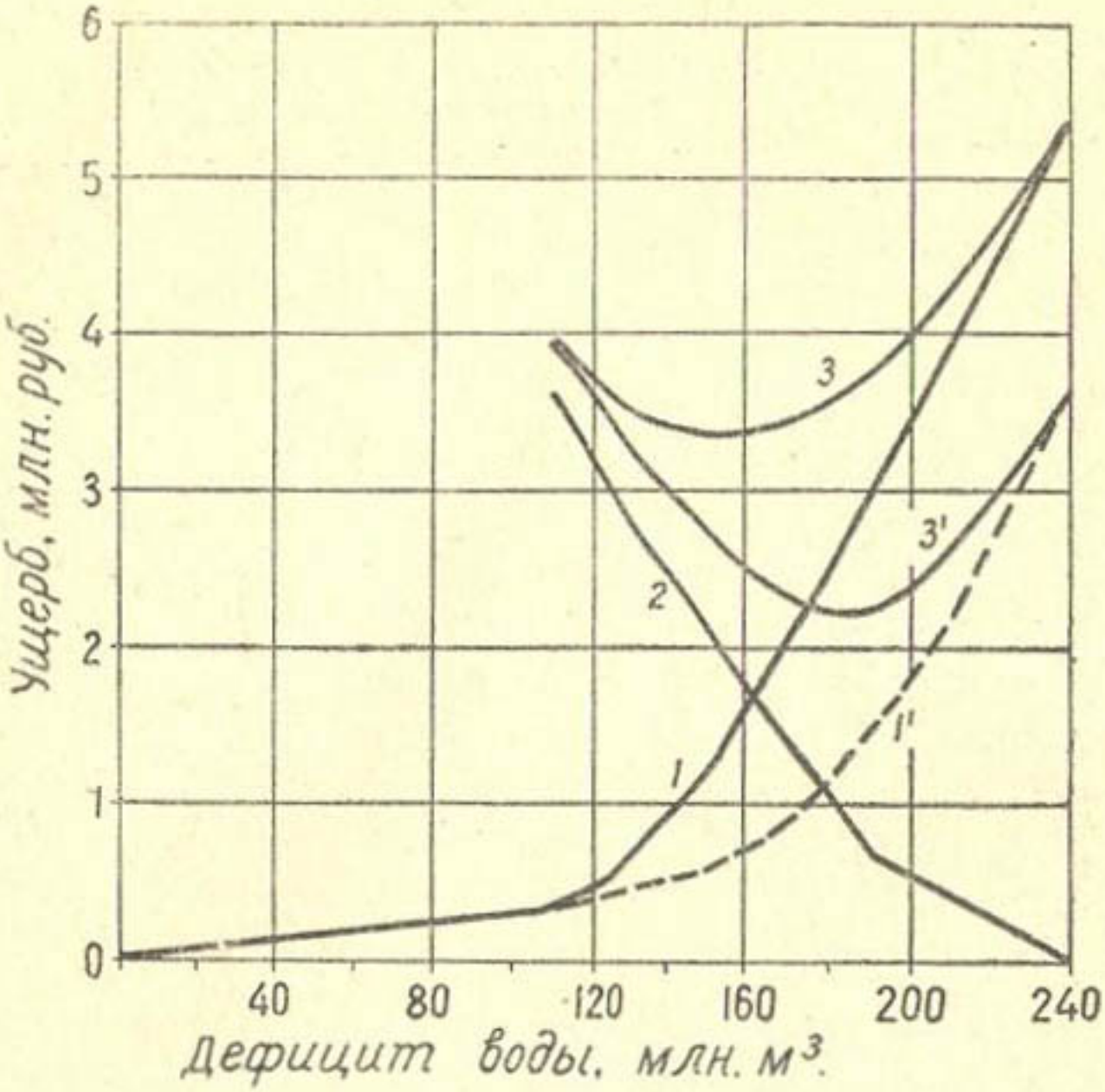


Рис. 61. Зависимости ущербов от ограничений в воде: *1*—производственно-энергетической системы (без ограничения коммунально-бытовой нагрузки системы); *1*[1]—то же с учетом ограничения коммунально-бытовой нагрузки; *2*—сельскохозяйственных потребителей; *3*—суммарные государственные ущербы от ограничений в воде без учета ограничений коммунально-бытовой нагрузки энергосистемы; *3*[1] — то же с учетом этих ограничений.

теме от ограничения каскада ГЭС водой в течение вегетационного периода. Из рисунка видно, что если весь дефицит воды (240 млн $м^3$) отнести на энергетику, то общий ущерб народного хозяйства составит не менее 5,35 млн руб.

Вопросы оценки ущерба при дефиците воды в сельском хозяйстве являются значительно более сложными и менее разработанными, чем в энергетике. Методы, использованные нами для оценки ущербов в энергетике и в промышленности, применительно к сельскому хозяйству будут, по-видимому, не совсем верными. С одной стороны, это объясняется тем, что снижение оросительных норм (без уменьшения числа поливов) при ограничениях в воде почти не сокращает затрат труда на производство сельскохозяйственной продукции, с другой — сельскохозяйственные предприятия являются в боль-

шинстве своем не государственными, а коллективными хозяйствами, и они вправе рассчитывать на компенсацию ущербов при ограничениях в воде. Учитывая также постоянную тенденцию к оказанию помощи сельскохозяйственным предприятиям со стороны государства, можно подойти к методике оценки ущербов от недодачи воды сельскохозяйственным потребителям с позиций выплаты полной компенсации им по государственным закупочным ценам за каждый килограмм снижения урожая, вызванного ограничением в воде.

Применительно к рассматриваемому нами примеру распределения дефицита воды между сельским хозяйством и гидроэнергетикой в Чуйской долине Киргизской ССР средние снижения урожая основных сельскохозяйственных культур, орошаемых из канала комплексного использования, подсчитаны в табл. 22. Максимальные возможные удельные ущербы на выплату компенсации хозяйствам (соответствующие полным затратам труда на недополученную продукцию, $C=0$) в случае ограничения их в воде будут при этом равны (табл. 24).

Таблица 24

Удельные ущербы на выплату компенсаций сельскохозяйственным предприятиям

(*коп/м*³ ограничения оросительной нормы нетто на полях)

Культура	Снижение урожая при ограничении до M_{min} *кг/м*³	Государственная закупочная цена *коп/кг*	Ущерб от выплаты компенсации при $C=0$, *коп/м*³	В переводе кормовых культур на мясо*, *коп/м*³	Максимальный ущерб на выплату компенсации, *коп/м*³		
					при ограничениях оросительной нормы		при посушках
Сено	1,0	0,5— 1,1	0,5— 1,1	2,9	2,9		6,0
Сахарная свекла	3,0	2,3	6,9	7,0	7,0		14,0
Пшеница	0,9	6,6— 9,2	6,0— 8,3	—	8,3		16,0
Конопля	1,2	7,7—12,0	9,3—14,4	—	14,4		29,0
Кенаф	1,3	10,0—13,0	13,0—17,0	—	17,0		34,0
Кукуруза	—	—	6,7—10,0	17,2	17,2		35,0
В том числе							
зерно	1,0	5,5— 7,5	5,5— 7,5	12,6	12,6		25,0
стебли	2,5	0,5— 1,0	1,2— 2,5	4,6	4,6		10,0

Построение зависимости суммарных ущербов от недодачи воды сельскому хозяйству должно производиться с учетом со-

---

* Мясо упитанности выше средней; закупочная его цена 80 *коп/кг*, что соответствует уровню цен рассматриваемого в примере маловодного 1961 г

става культур, их площади на ограничиваемом массиве орошения и к. п. д. оросительной системы.

В маловодном 1961 г. состав сельхозкультур, орошаемых из Чуйского ирригационного канала на участке ниже отвода на каскад ГЭС, был следующий:

Технические культуры

		га
Сахарная свекла	около	90000
Лубяные		200
Прочие		100

Зерновые

Пшеница	около	3000
Кукуруза		6000
Прочие		2000

Кормовые

Многолетние травы	11000
Прочие	1000

Коэффициент полезного действия рассматриваемого участка ирригационного канала и распределительной оросительной сети (до поля) около 0,5.

В этом случае ограничение сельскохозяйственных потребителей и передача каскаду ГЭС 1 млн $м^3$ воды в течение вегетационного периода потребует выплаты компенсации на сумму 14500 руб., если отнести весь дефицит воды на кормовые культуры (многолетние травы), приносящие минимальный ущерб при ограничениях их оросительной нормы. При бо́льшем ограничении сельского хозяйства в воде потребуется сократить оросительную норму, а затем посушить все площади многолетних трав и перейти к культурам с большими удельными ущербами (сахарной свекле, пшенице и т. д.).

На рис. 61 построена кривая *2* суммарного ущерба на выплату компенсаций при снижении урожая на рассматриваемом участке орошения в зависимости от величины дефицита воды в сельском хозяйстве за вегетационный период*.

---

* При этом не учитывалась возможность ограничения орошения сельскохозяйственных культур, расположенных выше каскада ГЭС и приносящих малые ущербы, а также возможность использования воды, прошедшей через гидроэлектростанции, для повышения урожайности на нижних землях. Учет этих возможностей понизит суммарные ущербы на выплату компенсаций и приведет к перераспределению воды между сельским хозяйством и гидроэнергетикой в пользу энергетики. Однако это возможно только при наличии соответствующей пропускной способности канала и дефиците воды в низовьях.

Уменьшение оросительных норм при этом практически может осуществляться путем соответствующего снижения поливных норм без сокращения числа поливов или путем сокращения числа поливов — по одному поливу с отдельных гектаров площади и культур в разное время вегетационного периода с тем, чтобы получить постоянный расход воды на ГЭС в течение всего периода.

§ 3. Распределение дефицита воды между сельским хозяйством и гидроэнергетикой

Недостаток воды приводит к ущербам как в сельском хозяйстве, так и в энергетике. Естественно, что при комплексном использовании водного источника вода между компонентами комплекса должна быть распределена таким образом, чтобы народное хозяйство в целом получило бы максимальный экономический эффект от ее использования или, что то же самое, суммарные убытки у компонентов комплекса при дефиците воды были бы минимальными.

На рис. 61 в качестве примера показана зависимость ущерба по производственно-энергетической системе Фрунзенского узла Киргизской ССР (кривая 1) от недодачи воды каскаду ГЭС в течение вегетационного периода 1961 г. (май-сентябрь) и зависимость ущерба на выплату компенсаций сельскохозяйственным предприятиям зоны орошения из Чуйского канала от ограничения их в воде (кривая 2) за тот же период. Указанные зависимости построены в одном масштабе, но с обратным направлением оси абсцисс*, что дает возможность, проведя вертикаль в любой ее точке, определить ущербы в энергетике и в сельском хозяйстве, соответствующие характеризуемому этой точкой распределению дефицита.

Кривая 3 представляет собой зависимость суммарного государственного ущерба от распределения общего дефицита воды (в данном случае 240 млн $м^3$) между сельским хозяйством и гидроэнергетикой. Минимум суммарного государственного ущерба достигается при отнесении 90 млн $м^3$ дефицита воды на сельское хозяйство и 150 млн $м^3$ на гидроэнергетику. Из кривой суммарного ущерба видно, что при предлагаемом распределении общий ущерб составит 3,35 млн руб. вместо 5, 35 руб. при отнесении всего дефицита воды на гидроэнергетику.

---

* Обе кривые построены в зависимости от величины дефицита в энергетике. Чем больше он в энергетике, тем меньше его остается на долю сельского хозяйства.

При построении кривой *1* зависимости ущерба по производственно-энергетической системе от недодачи воды каскаду ГЭС в нашем примере не принималась во внимание возможность ограничения бытовой и коммунальной нагрузки энергосистемы, определение ущерба по которым весьма затруднительно вследствие неопределенности ряда факторов, не поддающихся экономической оценке (например, отключение уличного освещения). Если же учесть ущерб от недодачи электроэнергии быту и коммунальному хозяйству по 4 *коп/квт·ч* (бытовой тариф), то кривая *1* сместится вправо (см. пунктирные построения на рис. 61)., а дефицит воды в сельском хозяйстве должен быть уменьшен примерно на 30 млн $м^3$. Общий ущерб при этом снизится, экономия же средств уменьшится, но и в этом случае остается весьма существенной (1,2 млн руб).

Проведенный анализ и разобранный пример показывают необходимость технико-экономического обоснования оптимального распределения воды между сельским хозяйством и гидроэнергетикой в периоды общего недостатка ее в условиях эксплуатации комплексных водохозяйственных установок и систем.

Существующая практика распределения воды, не допускающая каких-либо ограничений сельского хозяйства, в основе своей неверна. Она приводит к неэкономному расходованию воды в сельском хозяйстве и к огромным ущербам в промышленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексное использование водных и водноэнергетических ресурсов рек имеет несомненные преимущества перед некомплексным. В частности, комплексное разрешение водохозяйственной проблемы дает возможность использовать гидротехнические сооружения, созданные, например, для гидроэнергетики, попутно другими водопользователями, для которых постройка самостоятельных сооружений могла бы быть и невыгодной. Многолетнее регулирование стока комплексным гидроузлом, повышая обеспеченность годовых отдач воды, улучшает условия эксплуатации всех компонентов комплекса. Однако внутри года между компонентами комплекса иногда возникают противоречия в использовании водных ресурсов реки. Так, требования энергетики к водным ресурсам в большинстве своем не совпадают с требованиями к ним со стороны ирригации и с естественным режимом стока реки. Попытка улучшить режим реки при помощи водохранилищ или другими способами в интересах одного из компонентов комплекса часто приводит к ухудшению условий использования воды другим. Настоящая работа посвящена разработке методов координации интересов компонентов ирригационно-энергетических комплексов и получения таких решений, при которых будет достигаться максимальный народнохозяйственный эффект от использования водных ресурсов реки.

Исследования показали, что в большинстве комплексных ирригационно-энергетических объектов, сооружаемых в засушливых районах страны, ведущим компонентом является ирригация. Специальные попуски воды для гидроэлектростанций, приводящие к ограничениям сельского хозяйства, должны быть тщательно обоснованы. Методы определения оптимальной емкости регулирующих водохранилищ, экономически обоснованных попусков воды для ГЭС, установления ее оптимальной мощности и мощности оросительной системы (рас-

четной обеспеченности и величины подвешенной площади) описаны в главах II и III.

Однако вывод о малой экономической эффективности специальных попусков воды для ГЭС, приводящих к ограничениям сельского хозяйства, вовсе не означает малой эффективности самих ГЭС в комплексе. Наличие общих с ирригацией гидротехнических сооружений, использование небольших специальных (санитарных, рыбных и др.) попусков воды в течение невегетационного периода года и ирригационных расходов воды летом позволяют, как правило, установить на ГЭС весьма высоко экономичную рабочую и дублируемую тепловыми электростанциями системы мощность. Дублируемая мощность таких гидроэлектростанций, вырабатывая значительные количества гарантированной сезонной энергии, экономит топливо в энергетической системе и является прекрасной базой для развития электромашинного орошения и технической реконструкции сельского хозяйства.

В работе рассмотрены и некоторые вопросы эксплуатации комплексных ирригационно-энергетических объектов: установление очередности и глубины сработки водохранилищ, примерные правила ограничения потребителей воды и энергии в случае ее дефицита. Весьма важным и не получившим до сих пор теоретического обоснования является рассмотренный в работе вопрос о распределении возможного дефицита воды в маловодные (перебойные) годы между компонентами ирригационно-энергетического комплекса. Анализ его показал, что существующая практика распределения воды, не допускающая каких-либо ограничений сельского хозяйства, в основе своей неверна. Она приводит к неэкономному расходованию воды в сельском хозяйстве и большим ущербам в промышленности. Методика приближенного решения этой задачи дана в главе IV.

Сложность решаемых в работе вопросов, в особенности некоторых из них, поставленных впервые, привела к необходимости принятия ряда условностей. В связи с этим результаты работы требуют серьезного обсуждения и практической проверки. Все замечания по работе, несомненно, окажут помощь в проведении дальнейших исследований и будут приняты с благодарностью. Замечания следует направлять по адресу: Киргизия, г. Фрунзе, ул. XXII партсъезда, 267, Киргиз. НИИВХ.

ЛИТЕРАТУРА

1. АН СССР. Типовая методика определения экономической эффективности капитальных вложений и новой техники в народном хозяйстве СССР. Госпланиздат, 1960.
2. АН СССР. ЭНИН им. Г .М. Кржижановского. Разработка методики определения экономической эффективности комплексных гидроузлов и методики распределения затрат между водопользователями. Научный отчет Отдела общей энергетики. М., 1961.
3. Бахтиаров В. А. Расчеты компенсированного многолетнего регулирования стока на основе метода Г. П. Иванова. Труды Ленинградского гидрометеорологического ин-та, вып. 4, 1956.
4. Большаков М. Н. О расчете оросительной способности незарегулированных рек. Ж. «Гидротехника и мелиорация», № 3, 1951.
5. Вопросы агротехники сахарной свеклы в Киргизской ССР. Труды опытно-селекционной станции по сахарной свекле, Фрунзе, 1958.
6. Всесоюзная ордена Ленина Академия сельскохозяйственных наук им. В. И. Ленина. Экономическая эффективность капитальных вложений в сельское хозяйство. Экономиздат, М., 1962.
7. Генкель П. А. Засухоустойчивость растений и способы ее повышения. М., 1954.
8. Главводхоз МСХ СССР. Указания по составлению планов водопользования на оросительных системах, 1949.
9. Гипроводхоз МСХ СССР. Технико-экономические показатели экономичных прогрессивных проектов (эталоны) водохранилищ. Изд. МСХ СССР, 1960.
10. Горбунов Г. Г. Распределение активной нагрузки энергосистемы между тепловыми и гидравлическими электростанциями. Фонды Ленэнерго, 1952.
11. Григорович Н. А. Инструктивные указания по определению срока уравнивания затрат гидросиловых и тепловых электрических станций. Архив гидроэнергопроекта, 1944.
12. Гуглий И. В. К растету многолетнего регулирования речного стока с учетом корреляционных связей между величинами стока смежных лет. Проблемы регулирования речного стока, вып. 8, 1959.
13. Дружинин И. П. Свойства режима стока рек и методика построения типовых гидрографов. Изд. АН Киргиз. ССР, Фрунзе, 1959.
14. Захаров В. П. Сравнение условий перспективных и текущих

водноэнергетических расчетов. Вестник АН Казах. ССР, № 12, 1958, Алма-Ата.
15. Зузик Д. Т. Экономика водного хозяйства. Сельхозгиз, 1959.
16. Иванов Г. П. Некоторые частные задачи расчета многолетнего регулирования стока. Труды I совещания по регулированию стока, АН СССР, 1946.
17. Кан Пу-цин. К вопросу определения оросительной способности рек применительно к условиям Средней Азии. Автореферат канд. дисс. М., 1960.
18. Коваленко Б. Г. Перспективы энергетического использования реки Чу ниже Орто-Токойского водохранилища. Бюллетень «Народное хозяйство Киргизии», № 12, 1961.
19. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. О принципах выбора параметров водохозяйственных установок. Проблемы регулирования речного стока, вып. 2, М., 1948.
20. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Расчет многолетнего регулирования речного стока с учетом корреляционной связи между стоком смежных лет. Проблемы регулирования речного стока, вып. 8, М., 1959.
21. Магаков Г. Л., Семенов А. А. О принципах распределения затрат в строительстве водноэнергетических комплексных узлов. Проблемы гидроэнергетики и регулирования речного стока. Изд. АН СССР, 1960.
22. Маматканов Д., Дружинин И. П. К вопросу о построении обобщенных графиков для расчета многолетнего регулирования стока рек. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 1, изд. АН Казах. ССР, Алма-Ата, 1963.
23. Мартиросян Р. С., Определение расчетной водообеспеченности оросительной системы при незарегулированном стоке. Автореферат канд. дисс., М., 1962.
24. Мелентьев Л. А., Штейнгауз Е. О. Экономика энергетики СССР. Госэнергоиздат, 1959.
25. Методика определения экономической эффективности гидроэлектростанций, МСЭ СССР, Госэнергоиздат, 1961.
26. Омодео. А. Водные ресурсы Закавказья и их использование. ОНТИ — Энергоиздат, 1934.
27. Оранский И. Н. К вопросу выбора оптимальных мощностей гидроэлектростанций. ЭНИН АН Узб. ССР, канд. дисс., 1950.
28. Папелишвили К. А. К расчету оросительной способности рек в условиях восточных районов Грузии. Труды Груз. НИИГиМ, вып. 18—19, 1957.
29. Плешков Я. Ф. Быстрый и точный расчет водохранилищ. Ж. «Гидротехническое сторительство», № 6, 1936.
30. Примерные правила технической эксплуатации оросительных систем. МСХ СССР, главная инспекция по водному хозяйству, 1960.
31. Руководящие указания по выбору оптимальных режимов совместно работающих гидравлических и тепловых электростанций. МЭС СССР, Госэнергоиздат, 1956.
32. Саваренский А. Д. Определение расчетной обеспеченности орошения на основе метода системы водохозяйственных вариантов. Тр. совещания по рациональному водохозяйственному устройству Оренбургской области, Оренбург, 1961.
33. Саваренский А. Д. Метод расчета регулирования стока Ж. «Гидротехническое строительство», № 2, 1940.
34. Сванидзе Г. Г., Жгенти Л. Н. Распределение капитало-

вложений и ежегодных издержек между участниками водохозяйственного комплекса. Труды Ин-та энергетики АН Груз. ССР, т. XIII, 1960.
35. Степанков А. А. Основные вопросы экономики гидроэнергетики. Госэнергоиздат, 1956.
36. Тепляков И. Н. Приближенные оценки ущербов в электроэнергетическом хозяйстве, вызываемых изменчивостью гидрологических явлений. Канд. дисс., Ташкент, 1955.
37. Токомбаев К. А. Компенсация дефицита электроэнергии у сельских потребителей Киргизии. Фонды ИЭВХ АН Киргиз. ССР, 1960.
38. Трофимов В. В. К вопросу определения оросительной способности незарегулированного речного стока. Ж. «Гидротехника и мелиорация», № 5, 1952.
39. Фельдман М. П., Воздвиженский В. И. Определение себестоимости электроэнергии гидростанций. «Гидротехническое строительство», № 11, 1938.
40. Фельдман М. П. Оптимальная гарантированная мощность гидроэлектростанций. Проблемы регулирования речного стока, вып. 7, М., 1958.
41. Флексер Я. Н. Эксплуатация гидросиловых установок. Сельхозгиз, 1954.
42. Чеботарев М. П. Обеспеченность годового стока для расчета водохранилищ. Труды Киевского гидромелиоративного ин-та, вып. 6, 1956.
43. Чернецов А. Н. Гидромодульное районирование Фрунзенской области. Фонды ИЭВХ АН Киргизской ССР, Фрунзе, 1956.
44. Чернецов А. Н. Предзимние поливы зяби под сахарную свеклу, яровую пшеницу и люцерну. Труды Киргизской государственной селекционной станции, вып. 1, Фрунзе, 1940.
45. Чернецов А. Н. Научные отчеты Киргизского научно-исследовательского института земледелия за 1937—1942, 1956 гг. Фонды КиргизНИИЗ.
46. Чокин Ш. Ч. Расчетная обеспеченность работы гидроэлектростанций. Изд. АН Казах. ССР, Алма-Ата, 1958.
47. Шаввa К. И., Дружинин И. П. Определение удельных издержек по компенсации дефицита энергии в системе. Изв. АН Киргиз. ССР, т. 2, вып. 7, 1960.
48. Шаввa К. И. Методика определения оптимальной расчетной беспеченности источников орошения на незарегулированном стоке. Изв. АН Киргиз. ССР, т. 4, вып. 1, Фрунзе, 1962.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие 3
Введение 5
ГЛАВА I. Исходные предпосылки к технико-экономическому обоснованию комплексного ирригационно-энергетического использования рек 9
§ 1. Возможные схемы ирригационно-энергетического использования рек 9
§ 2. Сравнение расчетных условий проектирования и эксплуатации комплексных водохозяйственных объектов . . . 11
§ 3. Расчетный режим стока реки 13
§ 4. Оценка экономической эффективности капитальных вложений в ирригацию и гидроэнергетику 14
§ 5. Оценка экономической эффективности комплексных гидроузлов 18
§ 6. Экономические показатели компонентов комплексного ирригационно-энергетического использования водных ресурсов . 23
§ 7. Исходные положения для выбора параметров комлексного водохозяйственного объекта 28
§ 8. Принципы распределения воды между компонентами комплекса в условиях их эксплуатации 35
ГЛАВА II. Сравнительные технико-экономические расчеты при выборе основных параметров орошения 38
§ 1. Исходные положения 38
§ 2. Выбор расчетной обеспеченности государственных оросительных систем 41
§ 3. Выбор обеспеченности колхозных оросительных систем . 46
§ 4. Влияние внутригодового регулирования стока на величину расчетной обеспеченности орошения 49
§ 5. Выбор оптимальной оросительной способности реки при сезонном регулировании ее стока 53
§ 6. Оптимальная оросительная способность реки при сезонном компенсирующем регулировании ее стока 62
§ 7. Экономическая эффективность многолетнего регулирования стока 64
ГЛАВА III. Определение параметров орошения и гидроэнергетики при комплексном ирригационно-энергетическом использовании реки 75
§ 1. Режим использования проектируемой ГЭС в энергосистеме в условиях расчетной обеспеченности 75
§ 2. Построение расчетного графика нагрузки проектируемых ГЭС энергосистемы 77

§ 3. Распределение расчетного графика нагрузки гидроэлектростанций системы между участвующими в ней ГЭС . . . 79
1. Место ГЭС в суточном графике нагрузки энергосистемы 81
2. Очередность сработки водохранилищ сезонного регулирования 84
3. Выбор оптимальной глубины сработки водохранилищ 95
§ 4. Выбор мощности и производительности компонентов ирригационно-энергетического комплекса при заборе воды на орошение из верхнего бьефа ГЭС 106
§ 5. Выбор мощности и производительности компонентов комплекса при заборе воды на орошение из нижнего бьефа регулирующей ГЭС 125
§ 6. Выбор мощности и производительности компонентов комплекса в случае забора воды на орошение из обоих бьефов ГЭС 141
§ 7. Выбор параметров комплекса в случае забора воды на орошение из бассейна перерегулирования, расположенного ниже ГЭС 146
§ 8. Сравнение возможных схем коплексного использования водных ресурсов и выбор лучшей из них 150
§ 9. Аналитический способ выбора рабочей мощности ГЭС при ирригационно-энергетическом использовании реки . . 152
§ 10. Выбор рабочей мощности гидроэлектростанций в каскаде гидроузлов 164
§ 11. Определение экономической эффективности регулирования стока и оптимальной емкости регулирующих водохранилищ 180
1. При сезонном регулировании стока 180
2. При многолетнем регулировании стока. 198
ГЛАВА IV. Распределение водных ресурсов при их дефиците в условиях эксплуатации комплексного ирригационно-энергетического объекта 213
§ 1. Выбор величины площади орошения и порядок ограничения сельскохозяйственных культур в воде при ее дефиците в условиях эксплуатации оросительной системы 213
§ 2. Оценка ущерба в сельском хозяйстве и производственно-энергетической системе при ограничениях их в воде 223
§ 3. Распределение дефицита воды между сельским хозяйством и гидроэнергетикой 231
Заключение 233
Литература 235