

А. ЗАХИДОВ

**ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ
СИСТЕМЫ**

**СРЕДНЕЙ
АЗИИ**

· ФАН ·

АКАДЕМИЯ НАУК УЗБЕКСКОЙ ССР

ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ КИБЕРНЕТИКИ С ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМ ЦЕНТРОМ

А. ЗАХИДОВ

ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ
СИСТЕМЫ
СРЕДНЕЙ АЗИИ



ИЗДАТЕЛЬСТВО „ФАН“ УЗБЕКСКОЙ ССР
ТАШКЕНТ-1971

В книге рассматриваются современное состояние и перспективы развития водохозяйственных систем Средней Азии, излагаются принципы моделирования таких систем на ЭВМ; приводятся методы решения на моделях ряда конкретных задач по оптимальному проектированию и эксплуатации сложных водохозяйственных систем. В связи с этим подробно анализируется водный баланс орошаемого поля и излагаются методы расчета элементов баланса.

Книга предназначена для научных работников, аспирантов и широкого круга специалистов, работающих в области проектирования и эксплуатации комплексных ирригационно-энергетических водохозяйственных объектов, а также для студентов, специализирующихся в области водных проблем.

Ответственный редактор

академик АН УзССР В. К. КАБУЛОВ

Захидов, А.

Водохозяйственные системы Средней Азии. (Отв. ред. В. К. Кабулов). Т., «Фан», 1971.

132 с. (АН УзССР. Ин-т кибернетики с вычислительным центром). Библиогр.: с.

631.6

ВВЕДЕНИЕ

Рациональное использование водных ресурсов в районах орошаемого земледелия является одной из актуальных задач народного хозяйства СССР. На всех этапах развития Советского государства партия и правительство придавали этому вопросу огромное значение, рассматривая его как важнейшее общегосударственное мероприятие.

За годы, прошедшие после Великой Октябрьской социалистической революции, в орошаемых районах СССР созданы десятки крупных и технически совершенных водохозяйственных систем (ВХС). В процессе их создания был успешно решен целый ряд научных и технических проблем, возведено множество гидротехнических сооружений, водохранилищ и гидроэлектростанций, построены десятки крупных насосных станций для машинного орошения, сотни тысяч километров оросительных каналов и коллекторно-дренажной сети; общая площадь орошаемых земель возросла с 3,9 в 1913 г. до 11,2 млн. га в 1969.

Постановлениями XIII съезда КПСС и последующих пленумов ЦК КПСС были намечены еще более высокие темпы развития мелиорации и орошаемого земледелия в СССР. Так, в программе КПСС, утвержденной XIII съездом КПСС, отмечено, что орошаемая площадь в стране в 1980 г. должна быть доведена до 28 млн. га. Успешное претворение в жизнь этих грандиозных задач требует дальнейшего расширения и совершенствования ВХС орошаемых районов.

В главе I настоящей работы показаны этапы формирования, современное состояние и перспективы развития ВХС в бассейнах двух крупных рек Средней Азии — Сырдарьи и Амударьи. При этом широко использованы материалы генеральных схем комплексного использования и охраны водных ресурсов Узбекской, Киргизской, Таджикской и

Туркменской ССР, бассейнов рек Сырдарьи и Амударьи. Сформулированы научные проблемы, вытекающие из системного подхода к водохозяйственным мероприятиям в бассейнах этих рек.

Анализ водного баланса орошаемой территории содержится в главе II. Здесь особое внимание уделено таким элементам, как возвратные воды, атмосферные осадки, и методике их расчета. Расходные составляющие баланса рассматриваются в том объеме, в каком это необходимо для получения достоверной информации, используемой в последующих водохозяйственных расчетах. Подробно анализируются все виды потерь оросительной воды в ирригационных каналах и на полях орошения, даются рекомендации по максимально возможному их сокращению.

Глава III освещает вопросы моделирования ВХС на электронных вычислительных машинах (ЭВМ). Здесь излагаются принципы и методы моделирования, особенности подготовки исходной информации о водных ресурсах и водопотреблении, приводятся математические модели и алгоритмы решения на ЭВМ ряда водохозяйственных задач, приводятся также численные результаты расчетов на ЭВМ типа М-220 оросительной способности Сырдарьинской ВХС для случаев, когда сток рек не зарегулирован, когда сток регулируется двумя существующими долинными (Кайрак-кумским и Чардаринским) водохранилищами и когда осуществляется полное годовое регулирование стока.

Внедрение современных методов математического моделирования и средств вычислительной техники в практику водохозяйственных расчетов, бесспорно, откроет широкие перспективы для решения многих актуальных задач. Автор надеется, что данная работа послужит стимулом к новым изысканиям в этой области.

Глава I

ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ В РАЙОНАХ ОРОШАЕМОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РАЗВИТИЯ

В условиях социалистического общества экономические расчеты по обоснованию эффективности проектируемого водохозяйственного комплекса должны базироваться на государственном плане развития народного хозяйства и, прежде всего, учитывать интересы ведущей отрасли экономики в данном комплексе.

Государственный план предусматривает планомерное (пропорциональное) развитие всего народного хозяйства СССР с учетом экономики и направления развития отдельных районов.

В странах с жарким климатом и недостаточным количеством осадков искусственное орошение земель имеет большое социально-экономическое значение.

«...Климатические условия и своеобразие поверхности, особенно наличие огромных пространств пустыни, тянущейся от Сахары через Аравию, Персию, Индию и Татарию вплоть до наиболее возвышенных областей Азиатского плоскогорья, сделали систему искусственного орошения при помощи каналов и ирригационных сооружений основой восточного земледелия.* Эти слова Маркса блестяще подтверждаются историей многих народов и государств Востока, для которых и в прошлом и в настоящем вода служила источником жизни.

В СССР к районам интенсивного поливного земледелия относятся республики Средней Азии, Южный Казахстан, Закавказье и некоторые области Юга. Можно без преувеличения сказать, что жизнь, хозяйственное и культурное развитие этих районов были бы немыслимы без орошения.

О громадном значении орошения для республик Средней Азии и Закавказья неоднократно писал В. И. Ленин.

* К. Маркс. Британское владычество в Индии. К. Маркс и Ф. Энгельс, Соч., изд. второе, т. 9, стр. 132.

В искусственном орошении он видел один из важнейших факторов подъема и процветания народного хозяйства, ликвидации экономической и культурной отсталости этих бывших окраин царской России. В письме коммунистам Азербайджана, Грузии, Армении, Дагестана и Горской республики В. И. Ленин писал:

«...Орошение особенно важно, чтобы поднять земледелие и скотоводство во что бы то ни стало...

Сразу постараться улучшить положение крестьян и начать крупные работы электрификации, орошения. Орошение больше всего нужно и больше всего пересоздаст край, возродит его, похоронит прошлое, укрепит переход к социализму»^{*}.

Искусственное орошение на территории Средней Азии возникло в глубокой древности и развивалось на протяжении шести тысячелетий. Постепенно совершенствовались способы и техника полива, водозабор из источников питания и система его регулирования, проложение трасс оросительных каналов и их содержание; расширялись площади орошаемых земель и состав возделываемых культур. Народы Средней Азии отдавали этому делу всю свою творческую силу, таланты и знания. Народный опыт создания оросительных систем передавался из поколения в поколение и обогащался. О высоком мастерстве древних ирригаторов Средней Азии известный русский ученый А. Ф. Миддендорф в «Очерках Ферганской долины» (1882) пишет: «Мы изумляемся, видя, что столь неразвитый в техническом отношении народ сумел отвести на свои поля воду в крутой гористой местности, а расстояние 15 миль, мимо гор и долин; но еще большее удивление возбуждает то, что эти работы выполнены без всякого знания нивелировки, без всякого инструмента, необходимого для этого; мы удивляемся при виде каналов меньшего размера, исподволь опускающихся к долине вдоль отвесных стен, на половинной высоте их, и высеченных в твердой каменной массе, при виде туннелей, по которым проходит далее вода... Изумляемся мы также той целесообразности, с какою вода различных речных систем способствует водоснабжению одного и того же места».

В. И. Масальский в монографии «Туркестанский край» (1913) пишет: «При виде этих мощных потоков, несущих на многие десятки верст живительную влагу, невольно пропикаешься глубоким уважением к народу, который при крайне скудных технических познаниях, под палящими лу-

* В. И. Ленин. Товарищам коммунистам Азербайджана, Грузии, Армении, Поли. собр. соч., т. 43, стр. 199, 200.

чами туркестанского солнца ценою неимоверного труда избородил всю страну сетью оросительных артерий».

Установлено, что земли, на которых встречаются следы древнего орошения с сохранившимися каналами, пахотными бороздами, развалинами городищ и крепостей, занимают площадь 8—10 млн. га, примерно равную современной орошаемой территории (Андрианов и Кесь, 1967). Основная часть этих земель находится в Средней Азии и половина их — около 4,5—5 млн. га — сосредоточена в низовьях Сырдарьи и Амударьи, а это приблизительно в три раза превышает площадь современного орошения в этих же районах (Толстов, 1961).

Придавая огромное значение роли ирригации в истории развития человеческого общества, Маркс писал: «Такая система искусственного повышения плодородия почвы, зависевшая от центрального правительства и немедленно приходявшая в упадок при нерадивом отношении этого правительства к ирригационным и осушительным работам, объясняет тот не объяснимый иначе факт, что мы видим теперь бесплодными и пустынными целые территории, некогда бывшие прекрасно возделанными, как, например, Пальмира, Пётра, развалины Йемена и обширные провинции Египта, Персии и Индостана. Этим также объясняется тот факт, что одна опустошительная война оказывалась способной обезлюдить страну на целые столетия и лишить ее всей ее цивилизации»*.

История ирригации Средней Азии изобилует периодами расцвета и упадка оросительного хозяйства.

Постепенное развитие оросительных систем и расширение площади орошаемых земель почти во всех областях Средней Азии происходило примерно до середины I тысячелетия н. э. Древнейшая ирригационная сеть, относящаяся к IV тысячелетию до н. э., обнаружена в дельте Теджена (Лисицына, 1965).

В III—II тысячелетиях до н. э. орошение развивалось в низовьях Амударьи, Зарафшана и некоторых рек Ферганы (Гулямов, 1956, Латынин, 1962). В начале I тысячелетия до н. э. появились первые магистральные ирригационные каналы в Хорезме (Толстов и Андрианов, 1957). В середине I тысячелетия до н. э. возникла оригинальная система орошения в бассейне Атрека, в районе древнего Мессериана (Массон, 1964). В VI—V вв. до н. э. орошение в долине Зарафшана достигло расцвета,—земли, где сохранились следы древнего орошения, в низовьях Зарафшана по общей площади вдвое превосходят современный орошаемый оа-

* К. Маркс. Британское владычество в Индии. К. Маркс и Ф. Энгельс, Соч., изд. второе, т. 9, стр. 132.

зис (Шишкин, 1963). В IV—II вв. до н. э., когда земледельческая культура Хорезма достигла наибольшего расцвета, орошаемое земледелие развивалось и в бассейнах Мургаба и Теджена (Массон, 1959), в дельтах Таласа, Чу, Или и других рек Семиречья, в низовьях и притоках Сырдарьи. Так, по свидетельству древнегреческих и арабских историков и географов, в долинах Чирчика и Ангrena еще в III и II вв. до н. э. существовали крупные оросительные каналы; некоторые из них — Зах, Искандар, Бозсу, Карасу, Салар — сохранились до наших дней. На базе этих каналов возникло более 50 населенных пунктов, окруженных орошаемыми оазисами, обширными садами и виноградниками, в том числе нынешний Ташкент.

Начиная с середины I тысячелетия н. э. развитие ирригации в Средней Азии сопровождается многократно повторяющимися периодами разрушения и упадка. Так, нашествия кочевников — хионитов в IV в., эфтолитов в V в., тюрков в IV в. привели к опустошению обширных орошаемых оазисов. Нашествия арабов в VIII в., монголов в XIII в. вызвали новые разрушения оросительных систем и опустошение громадных территорий. В последующем немалый ущерб развитию ирригации Средней Азии наносили непрерывные разорительные феодальные войны между местными правителями.

Несколько оживились ирригационные работы после присоединения Средней Азии к России (Мамедов, 1965, 1967).

Отдавая должное мастерству народных ирригаторов прошлого, следует все же подчеркнуть, что ирригационная техника дореволюционного периода соответствовала очень отсталому социально-экономическому строю, низкому жизненному уровню народа и развивалась чрезвычайно медленно. Орошаемая площадь во всей Средней Азии до революции составляла около 2 млн. га.

Только после Октябрьской революции, в условиях социалистического ведения хозяйства, ирригационное строительство в республиках Средней Азии получает подлинно широкое развитие. Партия и правительство на всех этапах развития Советского государства придавали огромное значение вопросам орошения, рассматривая их как важнейшее общегосударственное мероприятие.

Начало планомерному широкому развитию ирригационного строительства и орошения земель в Советских республиках Средней Азии было положено в первый же год после Октябрьской революции историческим декретом Советского правительства от 17 мая 1918 г., подписанным В. И. Лениным, «Об ассигновании 50 миллионов рублей на оросительные работы в Туркестане и об организации этих работ».

В 20-е годы были созданы специализированные водохозяйственные проектно-изыскательские, строительные и эксплуатационные организации, высшие и средние учебные заведения и научно-исследовательские институты.

Создание первых объектов водохозяйственного строительства Средней Азии в конце 20-х и начале 30-х годов решало первоочередные задачи улучшения водообеспеченности старопахотных земель (Аскоченский, 1967 г.) и не было подчинено единой общей программе комплексного использования водных источников. После углубленного изучения земельных, водных и гидроэнергетических ресурсов и проведения обширных исследований в области ирригации и орошаемого земледелия, в 30-х годах впервые по основным речным бассейнам Средней Азии были разработаны научно обоснованные схемы комплексного ирригационно-энергетического использования водных ресурсов. Эти схемы, в дальнейшем неоднократно уточняемые и дополняемые, послужили основой планирования и развития водохозяйственного строительства в Средней Азии.

За годы Советской власти в орошаемых районах СССР созданы десятки крупных и технически совершенных водохозяйственных систем.

Основная цель ВХС орошаемых районов СССР — эффективное использование водных ресурсов для орошения.

Известно, что ирригация расходует воду главным образом в летний, вегетационный период на нужды сельского хозяйства, т. е. относится к категории водопотребителей. При этом общий размер возможной орошаемой площади обусловлен фактическими водными ресурсами и их внутригодовым распределением.

Внутригодовое распределение стока среднеазиатских рек в общем благоприятно для целей орошения. Поэтому до определенного времени эти потребности удовлетворялись естественным режимом рек и водохозяйственные мероприятия имели локальный характер, т. е. являлись отдельными частными решениями, не связанными между собой и не образующими того, что можно было бы назвать водохозяйственной системой.

По мере расширения площадей орошения все большее значение стали приобретать мероприятия по перераспределению водных ресурсов по территории и во времени. Появились многочисленные магистральные каналы и водохранилища (Аскоченский, 1967; Алексеевский, 1967). Одновременно строились гидроэлектрические станции для использования энергетических ресурсов рек (Захидов, 1962, 1963).

С развитием водного хозяйства и укрупнением отдельных ВХС усложнялись взаимоотношения между его отрас-

лями (главным образом между ирригацией и гидроэнергетикой) и взаимодействие между элементами ВХС (водохранилища, водозаборные узлы, гидроэлектрические и насосные станции и др.). Рациональное планирование и осуществление отдельных водохозяйственных мероприятий стало невозможным без увязки их в единое целое в пределах ВХС, а рациональная эксплуатация ВХС — без централизованного управления.

Отсюда возникает необходимость в разработке, с одной стороны, методики управления режимом работы действующих ВХС с последующей полной автоматизацией и возложением функций управления на электронные управляющие машины, с другой — методики нахождения целесообразных пределов развития ВХС и определения оптимальных параметров их элементов при проектировании.

Современные ВХС настолько сложны, что отыскание оптимальных технико-экономических решений при их эксплуатации и проектировании требует широкого применения современных математических методов и средств вычислительной техники.

Ниже приводится краткое описание основных ВХС Средней Азии и перспективы их развития.

Сырдарьинская ВХС

В бассейне р. Сырдарьи, протекающей по территории трех среднеазиатских республик (Киргизской, Таджикской и Узбекской СССР) и Южного Казахстана, имеется 497 постоянно действующих рек (за исключением р. Нарын со всеми ее притоками выше створа Уч-Курган) длиной 10 и более километров. Суммарная протяженность этих рек составляет 14 750 км. Здесь построено и ныне эксплуатируется около 1000 оросительных каналов общей протяженностью 53,5 тыс. км и свыше 300 коллекторов. Суммарная протяженность коллекторно-дренажной сети — 31,5 тыс. км. Единая ВХС, созданная в пределах бассейна, охватывает территорию в 0,53 млн. км² с населением 13,5 млн. человек (1966 г.), из которых 5,8 млн. городского и 7,7 млн. сельского. Городское население сосредоточено в 39 городах и 110 поселках городского типа. Общий земельный фонд в пределах ВХС представлен в табл. 1.

Следует подчеркнуть, что по поводу оценки земельного фонда, пригодного к орошению, имеются разные суждения (Летунов, 1962; Миркин, 1960; Герасимов, 1967; СОПС при Госплане СССР, 1965 и др.).

Динамика развития площади орошения в бассейне р. Сырдарьи выглядит следующим образом:

Год	Орошаемая площадь, тыс. га
1925	854
1934	1283
1938	1427
1950	1598
1957	1836
1962	2007
1963	1968
1965	2107

Сырдарья — самая длинная река Средней Азии. Образуется она от слияния Нарына и Карадарьи. Длина ее вместе с Нарыном 2671 км. Среднегодовой расход Нарына в створе Уч-Курган равен 417 м³/сек, а Карадарьи у Кампырравата — 123 м³/сек. Экстремальные значения среднегодовых расходов Нарына 540—267 м³/сек, Карадарьи 207—69,6 м³/сек. Поскольку Нарын дает 77% стока Сырдарьи, а Карадарья — 23%, то Сырдарья, особенно в верхнем течении, отражает режим Нарына.

Таблица 1

Водохозяйственный район	Площадь, тыс. га			
	валовая	пригодная к орошению	орошаемая в настоящее время (1965 г.)	возможный прирост
Верховья Нарына	7000	170	130	40
Ферганская долина	7800	1370	980	390
Голодная степь	2200	1050	410	640
ЧАКИР	3400	660	350	310
АРТУР	10700	1300	130	1170
Низовья	22000	1600	107	1493
Всего	53100	6150	2107	4043

Нарын (при выходе из гор), Карадарья и, соответственно, Сырдарья относятся к рекам снегово-ледникового питания (максимум стока в июне, минимум в январе — феврале). Однако у Нарына, вследствие более высоких отметок водосбора (средняя взвешенная высота $H_{ср}$ составляет 2775 м), сток концентрируется несколько позже, чем у Карадарьи ($H_{ср} = 2599$ м). Сток за март—июнь у Нарына составляет 45,2%, у Карадарьи — 53%, а за июль—сентябрь 35,5 и 29% годового стока соответственно. Основные притоки Сырдарьи принимает в пределах Ферганской долины.

Реки юго-западного склона Ферганского хребта являются правыми притоками Карадарьи. К их числу относятся:

Яссы ($34,25 \text{ м}^3/\text{сек}$), Кугарт ($22,8 \text{ м}^3/\text{сек}$), Кара-Унгур ($31,6 \text{ м}^3/\text{сек}$) и Майлису ($8,7 \text{ м}^3/\text{сек}$). Юго-Западный склон Ферганского хребта благоприятно ориентирован по отношению к влажным воздушным массам. Поэтому реки, формирующие здесь свой сток, отличаются наибольшей удельной водоносностью ($12,4 \text{ л/сек с } 1 \text{ км}^2$). Изменчивость годового стока C_v значительна: $0,20—0,31$.

Левые притоки Сырдарьи — это реки северного склона Алайского хребта: Куршаб ($25 \text{ м}^3/\text{сек}$), Талдык ($1,2 \text{ м}^3/\text{сек}$), Ак-Бура ($22,6 \text{ м}^3/\text{сек}$), Аравансай ($14 \text{ м}^3/\text{сек}$), Абширсай ($1,7 \text{ м}^3/\text{сек}$). Удельная водоносность рек Алайского хребта ($7,1 \text{ л/сек с } 1 \text{ км}^2$) намного ниже водоносности рек Ферганского хребта. Это объясняется невыгодной ориентацией и плохой доступностью Алайского хребта влажным воздушным массам. Изменчивость годового стока $0,10—0,20$.

Правыми притоками Сырдарьи являются реки, стекающие со склонов Чаткальского хребта и Кураминских гор. Их 16, не считая множества саев с возможным расходом селевых потоков от 20 до $170 \text{ м}^3/\text{сек}$. Наиболее водоносные из них Касансай ($11,5 \text{ м}^3/\text{сек}$), Падшаата ($8,7 \text{ м}^3/\text{сек}$), Гавасай ($6,1 \text{ м}^3/\text{сек}$) и Чаадаксай ($4,4 \text{ м}^3/\text{сек}$). Удельная водоносность рек Чаткальского хребта незначительна — $5,8 \text{ л/сек с } 1 \text{ км}^2$. Изменчивость годового стока составляет $0,27$.

Левые притоки Сырдарьи стекают с северного склона Алайского и Туркестанского хребтов. Наиболее крупные из них Сох ($45,9 \text{ м}^3/\text{сек}$), Исфайрам ($22,3 \text{ м}^3/\text{сек}$), Исфара ($15,7 \text{ м}^3/\text{сек}$), Ходжа-Бакирган ($11,0 \text{ м}^3/\text{сек}$), Шахимардан ($9,8 \text{ м}^3/\text{сек}$) и Аксу ($4,6 \text{ м}^3/\text{сек}$).

Показатели внутригодового распределения стока приведены в табл. 2. Параметры δ и W_{VII-IX} (по В. Л. Шульцу, 1965) означают: $\delta = \frac{W_{VII-IX}}{W_{III-VI}}$ — отношение объема стока за июль—сентябрь к объему стока за март—июнь, что характеризует условия питания рек; W_{VII-IX} — объем стока рек за июль—сентябрь, в процентах к годовому, что характеризует долю грунтового питания в стоке реки.

После выхода Сырдарьи из Ферганской долины с северного склона Туркестанского хребта и хребта Нурата в нее стекает множество рек, ручьев и саев, расходы которых измеряются десятками литров в секунду. Все они в вегетационный период целиком разбираются на орошение. Из них наиболее крупные — Заамин и Санзар; средние расходы их составляют $2—4 \text{ м}^3/\text{сек}$.

Правые притоки Сырдарьи — это также Чирчик ($219 \text{ м}^3/\text{сек}$), Ахангаран ($21,8 \text{ м}^3/\text{сек}$), Келес. Хребты, слагающие водосборы этих рек, имеют сравнительно неболь-

шую высоту (4500 м). Поэтому р. Чирчик и ее составляющие относятся к рекам снегово-ледникового питания, а Ахангаран и Келес — к рекам снегово-дождевого питания.

Таблица 2

Год	Показатель внутригодового распределения стока рек											
	с хребтов						Нарына		Кара-дарьи		Сум-марный приток	
	Кураминско-го и Чаткаль-ского		Ферганского		Алайского и Туркестан-ского							
	δ	W ^{VII-IX}	δ	W ^{VII-IX}	δ	W ^{VII-IX}	δ	W ^{VII-IX}	δ	W ^{VII-IX}	δ	W ^{VII-IX}
1933	0,36	12,2	0,26	17,4	2,05	53,9	0,74	34,3	0,55	27,9	0,80	35,2
1934	0,42	27,5	0,31	19,1	1,54	48,5	0,78	36,6	0,60	32,7	0,74	35,7
1935	0,40	24,1	0,34	21,8	2,00	52,6	0,82	36,6	0,64	30,2	0,82	36,3
1936	0,32	20,9	0,23	16,0	1,22	51,1	0,60	30,5	0,41	25,9	0,57	30,1
1937	0,36	22,1	0,30	18,7	1,55	47,7	0,91	38,6	0,54	28,7	0,78	35,2
1938	0,31	19,6	0,28	18,2	1,32	46,2	0,79	33,7	0,52	27,4	0,76	33,8
1939	0,34	21,0	0,29	18,6	1,92	50,8	0,73	33,8	0,60	22,1	0,81	35,6
1940	0,36	21,5	0,26	17,1	1,58	48,3	0,73	33,3	0,56	26,9	0,74	33,6
1941	0,19	14,2	0,21	14,3	1,28	45,0	0,54	28,8	0,36	22,4	0,54	29,1
1942	0,29	19,7	0,21	14,3	1,76	50,1	0,65	33,1	0,47	27,0	0,65	33,4
1943	0,36	22,7	0,27	18,2	1,84	50,1	0,86	37,2	0,55	27,8	0,79	35,7
1944	0,37	21,1	0,25	16,7	2,08	55,0	1,02	40,1	0,66	30,3	0,90	39,5
1945	0,32	20,9	0,29	18,4	1,56	48,8	0,73	34,4	0,54	29,7	0,72	34,3
1946	0,32	19,9	0,20	14,3	1,55	48,8	0,85	36,4	0,55	28,9	0,78	34,6
1947	0,35	20,6	0,34	20,9	1,72	45,4	0,87	35,1	0,62	27,4	0,86	34,9
1948	0,34	23,6	0,29	18,4	2,35	56,3	1,02	41,1	0,83	37,0	0,96	40,1
1949	0,41	24,8	0,26	16,8	1,88	50,4	0,9	38,6	0,65	32,8	0,80	36,3
1950	0,32	20,1	0,30	18,7	1,52	49,0	0,80	35,6	0,46	25,5	0,77	34,9
1951	0,47	24,9	0,33	19,6	1,46	43,8	0,77	33,4	0,63	28,8	0,76	32,5
1952	0,33	21,8	0,27	17,9	1,44	46,9	0,83	37,6	0,52	29,4	0,72	35,0
1953	0,30	20,0	0,22	15,2	1,58	45,8	0,68	34,3	0,53	28,4	0,66	32,0
1954	0,43	30,4	0,51	27,4	1,39	47,6	1,17	43,5	0,72	34,5	0,99	40,2
1955	0,35	21,9	0,27	17,8	1,50	46,7	0,66	31,5	0,48	28,2	0,66	32,0
1956	0,31	20,3	0,25	16,6	1,80	52,5	0,92	39,0	0,53	28,7	0,82	36,9
1957	0,43	24,1	0,43	23,9	1,65	47,4	0,88	36,5	0,79	34,6	0,95	38,3
1958	0,38	23,5	0,30	18,6	1,59	48,7	0,97	46,2	0,59	31,6	0,80	37,3
1959	0,33	21,1	0,23	15,9	1,66	49,9	0,90	38,8	0,54	29,5	0,79	36,3
1960	0,35	22,1	0,25	16,1	1,73	48,9	0,87	38,6	0,47	26,5	0,74	35,2
1961	0,32	19,9	0,21	15,0	1,54	47,3	0,74	33,1	0,46	24,0	0,72	33,0
1962	0,39	23,1	0,32	19,5	2,50	49,6	0,89	37,3	0,54	26,3	0,86	36,4
Среднемо-голетние данные	0,35	21,6	0,28	18,0	1,68	49,1	0,82	36,2	0,56	28,9	0,78	35,1
C _в	0,15	0,15	0,23	0,24	0,17	0,06	0,16	0,32	0,18	0,11	0,13	0,07

Удельная водоносность р. Чирчик — 20,2 л/сек с 1 км², р. Ахангаран — 15,2 л/сек. Изменчивость годового стока — 0,22 и 0,30 соответственно. Келес уступает Чирчику по удель-

ной водоносности в 7—8 раз. Максимум стока приходится на апрель, минимум — на август.

Следующий приток Сырдарьи — р. Арысь, сток которой формируется на сравнительно низких отметках. Это река снегово-дождевого питания. В 18 км от устья средний расход составляет $34,8 \text{ м}^3/\text{сек}$. Модуль стока — $5,1 \text{ л/сек}$. Расход реки в период вегетации полностью разбирается на орошение.

С юго-западного склона хребта Каратау по направлению к Сырдарье стекает значительное число речек, до нее не доходящих. Наивысшая отметка хребта Каратау 1800 м. Основным источником питания этих рек являются сезонные снега, которые начинают таять уже в феврале. Значительная роль в питании принадлежит также жидким осадкам. Максимальные расходы воды проходят обычно в марте. Общий поверхностный сток рек юго-западного склона Каратау округленно равен $20 \text{ м}^3/\text{сек}$, что дает модуль $3,6 \text{ л/сек}$.

Средние многолетние величины стока рек бассейна Сырдарьи приведены в табл. 3. Экстремальные значения среднегодового стока рек бассейна Сырдарьи $49—26,6 \text{ км}^3$.

Для обеспечения устойчивого водозабора и улучшения мелиоративного состояния около 2 млн. га ныне орошаемых земель в пределах Сырдарьинской ВХС проведен ряд водохозяйственных мероприятий:

1. Сооружены крупные оросительные каналы с водозабором из Нарына, Карадарьи и Сырдарьи — Большой Ферганский канал (БФК) им. У. Ю. Юсупова (пропускная способность в голове канала — $185 \text{ м}^3/\text{сек}$), Северный Ферганский канал ($100 \text{ м}^3/\text{сек}$), Южный (ЮФК) Ферганский канал ($50 \text{ м}^3/\text{сек}$); подводящий канал, обеспечивающий водозабор в каналы Шахрихансай ($150 \text{ м}^3/\text{сек}$), Андижансай ($54 \text{ м}^3/\text{сек}$), Савай ($20 \text{ м}^3/\text{сек}$); канал им. Ахунбабаева ($50 \text{ м}^3/\text{сек}$), Южный Голодноостепский канал ($300 \text{ м}^3/\text{сек}$), Северный Голодноостепский канал им. Кирова ($230 \text{ м}^3/\text{сек}$), Дальварзинский канал ($78 \text{ м}^3/\text{сек}$) и т. д.

2. Построены водоподъемные плотины: на Нарыне — Уч-Курганская; на Карадарье — Кампырраватская, Тешикташская и Куйганярская; на Сырдарье — Кайраккумская, Фархадская, Чардаринская, Кзыл-Ординская, Казалинская и осуществлено регулирование стока Сырдарьи Кайраккумским ($4,16 \text{ км}^3$) и Чардаринским ($5,7 \text{ км}^3$) водохранилищами.

3. Для повышения степени ирригационного использования водных ресурсов отдельных притоков Карадарьи и Сырдарьи с одновременным увеличением площади орошаемых земель и повышением водообеспеченности оросительных систем проведены при помощи магистральных каналов

многочисленные межбассейновые переброски стока: между Ак-Бурой и Куршабсаем — Отузадырский канал; между Ак-Бурой и Аравансаем — Араван-Акбуринский канал; между Аравансаем и Абширсаем — канал и наливное Найманское водохранилище (40 млн. м³); между Исфайрамом и Шахимарданом — канал им. XVIII партсъезда (Ляган); между Шахимарданом и Сохом — Сох-Шахимарданский канал (СШК); между ЮФК и Исфайрамсаем — канал и Кар-

Таблица 3

Река	Створ	Средний много- голетний сток	
		км ³	%
Нарын	Уч-Курган	13,4	36
Карадарья	Кампыррават	3,8	11
Притоки в пределах Ферганской долины	При выходе из гор	7,7	21
Притоки в пределах Голодной степи	До разбора на орошение	0,7	2
Чирчик	Ходжикент		
Ахангаран	Турк	8,4	23
Келес	Степное	3,2	7
Арысь и реки хребта Каратау			
Всего:		37,2	100

киданское водохранилище (100 млн. м³); между Касансаем и Алабука — канал и Ортотокойское водохранилище (100 млн. м³); между Сумсарсаем, Коксарексаем и Гавасаем — Чустский канал, между Чирчиком и Ангренем — Карасуйский, Большой Ташкентский каналы и Туябугузское водохранилище (250 млн. м³); между реками Арысь и Бугунь — Арысь-Туркестанский канал с Бугуньским водохранилищем (370 млн. м³) и другие.

4. Построены многочисленные насосные станции для целей орошения высокорасположенных земель. Наиболее крупные из них Абдусаматская, Фрунзенская, Ходжа-Бакирганская, Самгорская, Науская, Унжинская.

5. Построена разветвленная система коллекторно-дренажных и сбросных каналов. Это Северо-Багдатский, Сох-Исфаринский, Сары-Джуга, Средний Кызыл-Тепинский, Язьяванский, Улугнарский, Замбаркульский, Шоркульский, Асакинский, Шурузяк, Центральный Голодностепский, Главный пойменный, Карасуйский, Уртукли и другие. Некоторые из этих коллекторов не только дренируют прилегающие

орошаемые земли, но и принимают в свое русло потери галечниковых русел рек, лежащих выше конусов выноса, и сток этих рек в невегетационный период.

Потенциальные гидроэнергетические ресурсы бассейна Сырдарьи оцениваются в 21,8 млн. кВт, в том числе Нарына с притоками — 6,9, Карадарьи с притоками — 4,6, Сырдарьи с притоками — 10,3 млн. кВт. (Захидов, Чернова, 1963; Большаков, 1960; Калачев и др., 1958).

В настоящее время на реках бассейна Сырдарьи построено 25 относительно крупных районных и несколько десятков мелких сельских ГЭС с суммарной установленной мощностью 776,7 тыс. кВт, в том числе Уч-Курганская на р. На-

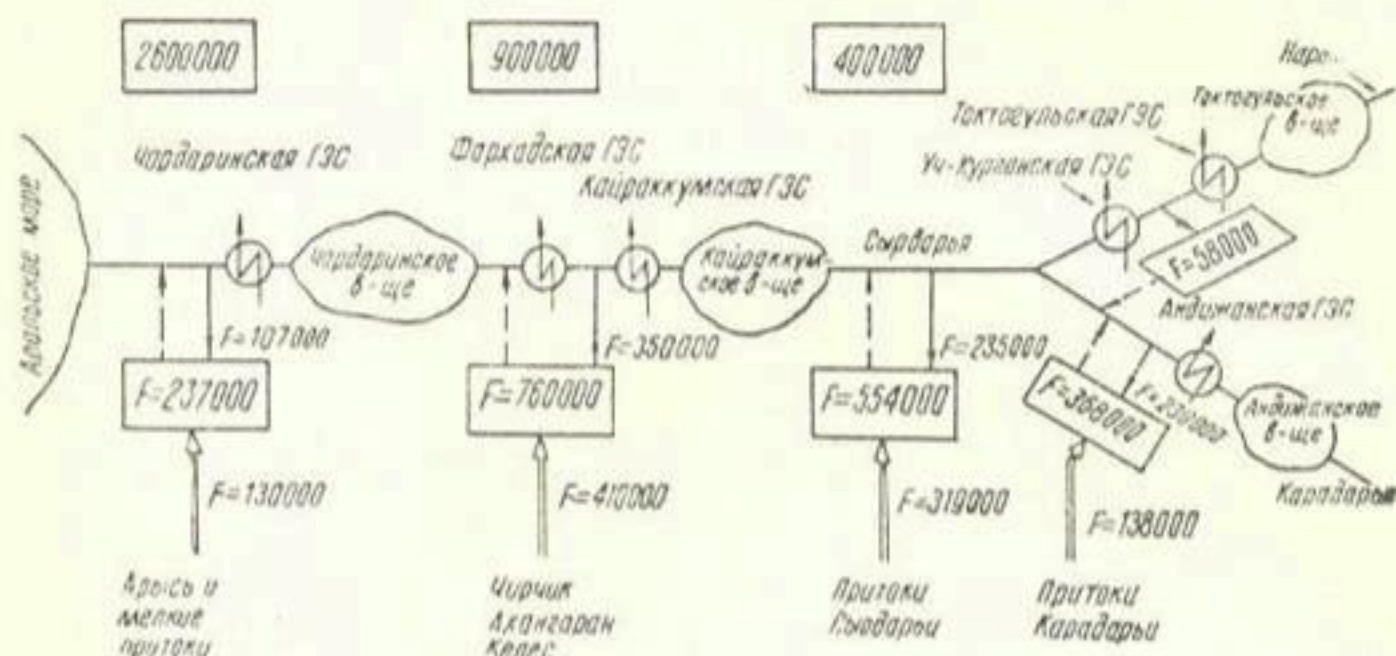


Рис. 1. Упрощенная линейная схема Сырдарьинской ВХС.

рын (180 тыс. кВт), Кайраккумская (126 тыс. кВт), Фархадская (114 тыс. кВт) и Чардаринская (100 тыс. кВт) на р. Сырдарья, а также каскад из 16 ГЭС на Чирчик-Бозсуйском водном тракте.

Таким образом, Сырдарьинская ВХС в современном ее состоянии (рис. 1) включает:

разветвленную речную сеть со среднегодовым стоком воды в 37,2 км³;

многочисленные водозаборные узлы, насосные станции и широкую сеть оросительных каналов;

орошаемые земли размером свыше 2 млн. га;

обширную систему коллекторно-дренажных и сбросных каналов;

восемь действующих водохранилищ суммарной емкостью 10,8 км³ и четыре строящихся суммарной емкостью 23,1 км³;

несколько десятков ГЭС разной мощности в различных частях системы;

водозаборные узлы для коммунально-бытового и промышленного водоснабжения.

В настоящее время проводятся большие работы по расширению и совершенствованию ВХС. На р. Нарын строится Токтогульское водохранилище полезной емкостью 12,6 км³ и гидроэлектростанция мощностью 1,2 млн. кВт, на р. Карадарья — Андижанское водохранилище емкостью 1,75 км³ и гидроэлектростанция мощностью 100 тыс. кВт, на р. Чирчик — Чарвакское водохранилище емкостью 2 км³ и гидроэлектростанция мощностью 600 тыс. кВт; на р. Бугунь — Бугуньское водохранилище емкостью 0,37 км³. Строятся Большой Андижанский, Большой Наманганский, Кызылкумский и другие магистральные оросительные каналы. Во всех водохозяйственных районах расширяются площади орошаемых земель. Особенно большие работы по освоению новых и улучшению водообеспеченности старопашотных земель ведутся в Ферганской долине, Голодной степи, в низовьях Сырдарьи. Одновременно с целью улучшения мелиоративного состояния орошаемых земель расширяется сеть коллекторно-дренажных систем. В широких масштабах проводится планировка орошаемых земель, укрупняются поливные участки, реконструируется внутрихозяйственная оросительная сеть, улучшается техническая оснащенность оросительных систем.

Амударьинская ВХС

Бассейн р. Амударьи с тяготеющими к нему в водохозяйственном отношении районами занимает площадь более 1,3 млн. км². В границах этого бассейна расположены вся территория Туркменской ССР, 91% территории Таджикской ССР, 86% территории Узбекской ССР, 0,4% территории Киргизской ССР, северные провинции Афганистана (257 тыс. км²) и северо-восточные районы Ирана (65,6 тыс. км²).

Часть бассейна, расположенная на территории СССР, занимает площадь свыше 1 млн. км², ее население — 8,2 млн. человек (1966 г.), в том числе 2,6 млн. городского и 5,6 млн. сельского. Городское население сосредоточено в 43 городах и 120 поселках городского типа. Общий земельный фонд в пределах этой части бассейна представлен в табл. 4. Здесь 315 постоянно действующих рек (за исключением рек Вахш и Пяндж со всеми их притоками) длиной 10 и более километров. Суммарная протяженность этих рек составляет 11 250 км. Построено и ныне эксплуатируется свыше 1200 оросительных каналов общей протяженностью 82 тыс. км. Суммарная протяженность коллекторно-дренажной сети составляет 25,6 тыс. км.

Поверхностные водные ресурсы территории складываются из ресурсов собственно Амударьи и бессточных рек, тяготеющих к ней в водохозяйственном отношении.

Амударья — самая многоводная река Средней Азии. Образуется она от слияния Вахша и Пянджа. По условиям формирования Амударья принадлежит к рекам с ледниково-снеговым питанием и отличается наиболее благоприятным для ирригации внутригодовым распределением стока. Длина ее 1437 км. Основные притоки Амударья принимает только на первых 180 км; на протяжении остальных 1257 км вследствие разбора воды на орошение, потерь на испа-

Таблица 4

Республика	Площадь, тыс. га			
	валовая	пригодная к орошению	орошаемая в настоящее время (1965 г.)	возможный прирост
Туркменская	48800	7012	520	6492
Таджикская	13000	621	286	335
Узбекская	38840	5081	1104	3975
Киргизская	760	9	9	
Всего:	101400	12723	1919	10804

рение и фильтрацию сток постепенно уменьшается. На 12-м километре от места слияния Пянджа и Вахша в Амударью слева впадает р. Кундуздарья, на 38-м справа — р. Кафирниган, на 137-м справа — р. Сурхандарья и на 180-м километре справа — р. Шерабаддарья (Шульц, 1958).

Благодаря развитию орошаемого земледелия в бассейнах этих притоков часть их стока разбирается на орошение. Поэтому средний многолетний сток Амударьи, определяемый по наблюдаемым на ст. Керки данным (с 1911 по 1965 гг.), дает только приближенное представление о поверхностных водных ресурсах этого бассейна (63,5 км³ в год). В настоящее время выше гидрометрической станции Керки водами Амударьи и ее составляющих орошается около 800 тыс. га, в том числе на территории Афганистана — 233 тыс. га. Динамика развития орошения из Амударьи и ее составляющих выше ст. Керки приводится в табл. 5.

В генеральной схеме комплексного использования водных ресурсов Амударьи, составленной Среднеазиатским отделением института «Гидропроект», средний многолетний сток Амударьи и ее составляющих при выходе их из гор, где

еще мало сказывается отбор воды на орошение, определен в размере 68,1 км³ в год.

К рекам, тяготеющим в водохозяйственном отношении к Амударье, относятся: Кашкадарья, Зарафшан, Мургаб, Теджен, Атрек и реки северного Афганистана — Хульм, Балхоб, Сарыпуль, Кайсар и другие. Суммарный сток этих рек при выходе из гор, учтенный гидрометрически, составляет 11,3 км³ в год. В бассейнах их развито орошаемое земледелие, причем, как уже отмечено, искусственное орошение здесь применяется с древнейших времен. Естественно полагать, что

Таблица 5

Республика	Площадь, тыс. га			
	1950 г.	1955 г.	1960 г.	1965 г.
Киргизская	7	7	7	9
Таджикская	197	225	257	271
Узбекская	123	140	152	146
Туркменская			40	132
Афганистан				233

оценка стока этих рек также является приближенной. В настоящее время размер орошаемой площади составляет свыше 900 тыс. га, в том числе на территории Афганистана и Ирана — около 250 тыс. га.

Средняя годовая величина поверхностных водных ресурсов всей рассматриваемой территории, полученная путем простого суммирования учитываемых стоков всех рек бассейна, составляет 79,4 км³. В эту цифру не входят ресурсы, формирующиеся за счет атмосферных осадков непосредственно на равнинной части территории.

Таким образом, можно констатировать, что оценка поверхностных водных ресурсов бассейна Амударьи в размере 79,4 км³ в год является не только приближенной, но и значительно заниженной.

Подземные водные ресурсы изучены слабо. Оценка динамических запасов подземных вод в бассейне Амударьи в 1,65 км³ в год (сделанная Среднеазиатским отделением института «Гидропроект») недостаточно обоснована и значительно занижена (Бостонджогло, 1968). Наоборот, прогнозные эксплуатационные запасы, оцененные гидрогеологами в 10—15 км³ в год по бассейну Амударьи и 25—30 км³ в год по Среднеазиатскому экономическому району в целом, по видимому, преувеличены. Следует подчеркнуть, что в работах по исследованию подземных вод нет детального анализа условий их формирования. Между тем известно, что искусственное перераспределение поверхностных водных ресурсов

как в пространстве, так и во времени, проводимое водохозяйственными организациями в связи с развитием орошаемого земледелия, существенно влияет как на запасы и размещение, так и на режимы и качество подземных вод. До конца не выяснена роль атмосферных осадков, выпадающих на равнинные территории, в формировании подземных вод. Необходимы совместные исследования гидрогеологов, гидрологов, почвоведов, гидрохимиков и мелиораторов с целью изучения условий формирования и качества, а также уточ-

Таблица 6

Бассейн Амударьи в пределах СССР	Орошаемая площадь, тыс. га			
	1950 г.	1955 г.	1960 г.	1965 г.
В целом	1475	1598	1685	1919
Собственно Амударья	812	911	1013	1256
в том числе:				
верхнее течение (до Каракумского канала)	327	372	416	426
среднее течение (до Туямуянского гидроузла)	93	99	148	373
нижнее течение (до Аральского моря)	392	440	449	457
Бессточные реки	663	687	672	663

нения запасов подземных вод. Актуальность этой проблемы не вызывает сомнений, так как подземные воды являются существенным резервом и в орошаемом земледелии, включая обводнение пастбищ, и в коммунально-бытовом и промышленном водопотреблении.

В бассейне Амударьи орошается около 2,5 млн. га, в том числе на территории СССР — 2 млн. га со следующим распределением по республикам: Узбекская ССР — 1,2 млн. га, Таджикская ССР — 0,3 млн. га и Туркменская ССР — 0,5 млн. га. Динамика развития орошения в бассейне Амударьи на территории СССР приводится в табл. 6.

Свободный земельный фонд, пригодный для орошения, составляет около 12 млн. га, в том числе на территории СССР — 10,8 и за его рубежами — свыше 1,3 млн. га.

Потенциальные гидроэнергетические ресурсы бассейна Амударьи оцениваются в 39 млн. квт, в том числе Вахша с притоками — 12,3, Пянджа с притоками — 17,0 и Амударьи с притоками — 9,7 млн. квт.

К настоящему времени на реках бассейна Амударьи построено несколько десятков относительно мелких районных и сельских гидроэлектростанций с установленной суммарной мощностью 370 тыс. квт; это каскад Вахшских ГЭС — Голов-

ная (210 тыс. кВт), Перепадная (29,9 тыс. кВт) и Центральная (18,6 тыс. кВт); каскад ГЭС на Даргом-Талигулянском водном тракте в бассейне реки Зарафшан — Хишрауская (21,9 тыс. кВт), Талигулянские № 1 и № 2 (11,8 тыс. кВт) и Иртишарская (7,0 тыс. кВт); каскад Варзобских ГЭС — № 1 (7,1 тыс. кВт), № 2 (14,8 тыс. кВт) и № 3 (3,5 тыс. кВт).

Для рассматриваемой территории характерны резкая диспропорция между земельным фондом, пригодным под орошение, и водными ресурсами, отдаленность пригодных под орошение земель от источников орошения, пока еще слабое использование на нужды орошения водных ресурсов, а также гидроэнергетического потенциала рек.

В бассейне Амударьи построены многочисленные оросительные системы, рассчитанные примерно на 2 млн. га земель. Подробная характеристика этих систем приводится в монографии А. А. Асоченского (1967). Наиболее значительные из них — Зарафшанская, Вахшская, Сурхан-Шерабадская, Кашкадарьинская, Чарджоуская, Мургаб-Тедженская, Туямуюнская, Тахиаташская системы.

До сих пор было принято считать эти и многие другие ирригационные системы бассейна Амударьи самостоятельными, локальными. Такой взгляд, приемлемый в прошлом, становится ошибочным в настоящее время, а тем более в перспективе. Теперь необходимо рассматривать все ирригационные системы бассейна Амударьи как фрагменты единой Амударьинской ВХС. Рассмотрим более подробно процесс ее формирования.

Зарафшанская ирригационная система — одна из древнейших в Средней Азии. За годы Советской власти проведены большие работы по ее реконструкции и развитию. В связи с переходом на новую систему орошения (с 1951 г.) укрупнены поливные карты и сокращена протяженность внутрихозяйственной сети, построено много новых оросительных каналов и коллекторов, улучшена оснащенность гидротехнических сооружений инженерным оборудованием и измерительной аппаратурой, введены в действие Первомайская, Дамходжинская, Вабкентская плотины, Каттакурганское и Куюмазарское водохранилища и т. д.

До ввода в эксплуатацию Амубухарского машинного канала система функционировала изолированно как локальная, питающаяся за счет водных ресурсов р. Зарафшан и ее притоков. Дальнейшее развитие орошения и расширение посевных площадей в пределах системы (земельный фонд, пригодный для орошения, в бассейне Зарафшана оценивается СОПСом при Госплане СССР в 1,5 млн. га) привело к необходимости переключения части земель на питание из водных ресурсов Амударьи. Так возникли Амубухарский и Аму-

каракульский машинные каналы, связывающие рассматриваемую систему с Амударьей. Появилась возможность расширить площади орошаемых земель в среднем течении Зарафшана за счет собственных водных ресурсов системы.

Генеральной схемой комплексного использования водных ресурсов УзССР предусматривается увеличение общей площади орошаемых земель в пределах бассейна р. Зарафшан к 1980 г. до 1 100 тыс. га, при этом прирост площади нового орошения составит 536 тыс. га, в том числе за счет водных ресурсов бассейна Зарафшана — 124 тыс. га, Амударьи — 412 тыс. га. Для обеспечения этого прироста намечено построить водохранилища в верхнем течении Зарафшана (Дупулинское) полезной емкостью 500 млн. м³, в нижнем (Тудакульское) — полезной емкостью 544 млн. м³, в Каршинской степи (Шорсуйское) — полным объемом 2500 млн. м³ и три мелких водохранилища на притоках Зарафшана (Карасу, Ургутсай, Агалыксай).

Таким образом, в перспективе появляется второе звено, связывающее Зарафшанскую ирригационную систему с Амударьей, — Каршинский магистральный канал с Шорсуйской веткой и водохранилищем, и система становится неотъемлемой частью Амударьинской ВХС.

Кашкадарьинская ирригационная система — самая маловодная в юго-западном Узбекистане. В настоящее время ею орошается около 100 тыс. га земель. Для устойчивого обеспечения их оросительной водой построен Эски-Ангорский магистральный канал длиной 184 км с головным расходом 47 м³/сек, связывающий систему с рекой Зарафшан.

Построены и эксплуатируются Чимкурганское (полезной емкостью 450 млн. м³) и Пачкамарское (270 млн. м³) водохранилища. Однако пригодный для орошения земельный фонд в пределах системы, включая смежные районы, превышает миллион гектаров. Тут расположена Каршинская степь, отличающаяся от Голодной степи лучшими почвенно-климатическими условиями.

Генеральной схемой предусмотрено увеличение общей площади орошаемых земель в пределах Кашкадарьинской ирригационной системы к 1980 г. до 630 тыс. га; при этом прирост площади нового орошения составит около 530 тыс. га, в том числе за счет водных ресурсов Амударьи — свыше 500 тыс. га. Для обеспечения такого прироста намечено и осуществляется строительство Каршинского магистрального канала (водозабор из Амударьи) с Талимарджанским водохранилищем, объем которого 1300 млн. м³.

Каршинский магистральный канал через Шорсуйскую ветку, как уже отмечалось, обеспечивает оросительной водой

часть земель нового орошения Зарафшанской ирригационной системы.

Таким образом, в перспективе система будет связана с Амударьей мощным ирригационным каналом с головным расходом 400—500 м³/сек и через Шорсуйскую ветку (длиной 180 км, с головным расходом 300 м³/сек) свяжет Амударью с Зарафшанской ирригационной системой. Объединенная Зарафшан-Кашкадарьинская ирригационная система станет частью будущей Амударьинской ВХС.

Вахшская, Кафирниганская и Сурхан-Шерабадская ирригационные системы орошают 426 тыс. га земель (на 1965 г.): на территории Таджикской ССР — 271, Узбекской ССР — 146 и Киргизской ССР (в верховьях Вахша) — 9 тыс. га. Возможный в перспективе прирост орошаемых земель в пределах этих систем — 485 тыс. га, в том числе на территории Таджикской ССР — 355 и Узбекской ССР — 150 тыс. га.

За годы Советской власти проведены большие работы по реконструкции и развитию систем. Например, в бассейне р. Вахш построены Головная (установленная мощность 210 тыс. кВт), Перепадная (29,9 тыс. кВт) и Центральная (18,6 тыс. кВт) ГЭС, Вахшский магистральный канал (180 м³/сек) с водозабором от плотины Головной ГЭС, на который переключено питание старых каналов с соответствующей их реконструкцией. Сооружена широкая сеть коллекторно-дренажных систем со сбросом дренажных вод в реки Вахш и Пяндж. Строится Нурекская ГЭС (2,7 млн. кВт) с водохранилищем полезной емкостью 4,5 млрд. м³. Проектируется строительство Рогунской ГЭС (3,2 млн. кВт) с водохранилищем полезной емкостью 8,6 млрд. м³. На р. Сурхандарья построены и эксплуатируются Южносурханское (800 млн. м³) и Учкызылское (165 млн. м³) водохранилища. Осуществлена межбассейновая переброска стока — между Сурхандарьей и Шерабадарьей с помощью Сурхан-Шерабадского канала, Сурхандарьей и р. Душанбе — с помощью Большого Гиссарского канала.

Введение в строй всех названных водохранилищ и расширение площади орошаемых земель в пределах рассматриваемых систем окажут заметное влияние на режим и величину стока Амударьи. Следовательно, эти системы в перспективном плане также должны рассматриваться как часть Амударьинской ВХС. По аналогичным же соображениям необходимо включить в состав Амударьинской ВХС ирригационную сеть северного Афганистана, где в настоящее время за счет водных ресурсов рек бассейна Амударьи орошается 233 тыс. га земель.

Мургаб-Тедженские ирригационные системы относятся к древнейшим и наиболее маловодным в Средней Азии.

Сток рек Мургаб и Теджен в основном формируется и в значительной части используется на орошение на территории Афганистана и Ирана. Реки эти отличаются ничтожной водоносностью. Так, средний модуль стока р. Мургаб при вступлении ее на территорию Туркменской ССР, с учетом разбора воды на орошение в пределах Афганистана, не превышает 2 л/сек, средний модуль стока р. Теджен также с учетом разбора воды на орошение в пределах Афганистана и Ирана — 1 л/сек (Шульц, 1958).

В настоящее время на территорию Туркменской ССР по этим рекам поступает не более 2 км³ воды в средний по водности год. В перспективе в связи с развитием орошения в Афганистане и Иране следует ожидать дальнейшего уменьшения стока, поступающего по этим рекам на нашу территорию. Между тем, земельный фонд, пригодный для орошения, в бассейнах этих рек на территории Туркменской ССР составляет 950 тыс. га. За счет водных ресурсов Мургаба и Теджена орошается около 120 тыс. га.

Сток р. Мургаб регулируется пятью водохранилищами общей полезной емкостью 280 млн. м³. Дальнейшее повышение степени зарегулированности стока этих рек строительством Тахтабазарского водохранилища на Мургабе (500—600 млн. м³) и Пулихатумского или Наурузабадского — на Теджене (около 1 млрд. м³) не даст заметного прироста орошаемых земель. Кардинальное решение проблемы орошения земель Мургаб-Тедженского бассейна возможно путем привлечения водных ресурсов Амударьи, что и осуществляется в настоящее время путем строительства Каракумского канала с водохранилищами суммарной емкостью 2,8 км³. Каракумский канал протяженностью около 1500 км одновременно решает проблему орошения, обводнения и водоснабжения земель и населенных пунктов юго-западной Туркмении. По схеме дальнейшего развития Каракумского канала, разработанной институтом «Туркменгипроводхоз», предусматривается к 1980 г. орошение 1 млн. га новых земель, в том числе в Мургаб-Тедженском бассейне 565 и в юго-западной Туркмении — 435 тыс. га.

Таким образом, Каракумский канал объединяет и значительно расширяет многочисленные разрозненные ирригационные системы южной и юго-западной Туркмении и связывает их с Амударьей.

Чарджоуские ирригационные системы — объединенные нами условно под одним названием многочис-

ленные мелкие оросительные системы, расположенные узкой полосой в среднем течении Амударьи, — существуют с давних времен. За годы Советской власти проведены большие работы по укрупнению, расширению и совершенствованию этих систем. Вместо 350 мелких было создано 14 относительно крупных ирригационных систем с общей площадью орошения 120 тыс. га. Возведено много гидротехнических сооружений инженерного типа, укрупнены поливные карты, значительно сокращена протяженность ирригационной сети, построена коллекторно-сбросная сеть, повышены к. п. д. систем. Однако водозабор из Амударьи в системы осуществляется по-прежнему без плотины. Перспектива развития систем ограничена — свободный земельный фонд, пригодный для орошения, составляет около 50 тыс. га.

Ирригационные системы низовьев Амударьи — древнейших очагов земледельческой культуры — существуют с незапамятных времен. На протяжении многих тысячелетий здесь создавались и разрушались сотни ирригационных систем. К началу XX в. общая протяженность искусственной гидрографической сети в низовьях Амударьи составляла 35—40 тыс. км. До наших дней сохранились такие крупные ирригационные каналы как Палван, Газават, Шават, Клычниязбай, Ярмыш, Каттагар и следы многочисленных заброшенных древнейших каналов — Сипайяба, Шахмурата, Черменяба и других. «Водозабор в эти каналы истари был приспособлен к изменчивому режиму р. Амударьи с ее блужданием русел, колебаниями уровней воды и отметок дна, передвижкой песчаных островов, обилием взвешенных (илистых) и донных (песчаных) наносов. В этих труднейших условиях древними ирригаторами была изобретена система многоголового водозабора, позволявшая путем открытия и закрытия отдельных голов (сак) регулировать количество воды, поступающей из реки в оросительные системы. При выходе из строя какой-либо головы в результате разрушения берега (дейгиша) или отхода реки от точки водозабора действовали остальные головы или устраивались новые. Чем большую длину имел фронт водозабора, тем больше голов на нем размещалось и тем выше была степень обеспеченности водозабора. Поддерживать такие многоголовые системы в рабочем состоянии можно было лишь ценой огромных затрат человеческого труда, тягла и местных материалов» (Аскоченский, 1967).

В годы Советской власти ирригационные системы низовьев Амударьи подверглись коренной реконструкции. Построено много новых оросительных каналов, значительно усовершенствована система водозабора из Амударьи с сокращением количества головных точек. Наиболее крупные

каналы оборудованы шлюзами-регуляторами. Построены мощные насосные станции для подпитывания каналов при низких уровнях воды в реке.

Проведены большие работы по мелиорации земель. Укрупнены поливные участки, внедрена новая система орошения. Сокращена общая протяженность оросительных каналов (до 15 тыс. км). Сооружены дренажные системы. Упорядочен отвод дренажных вод.

В настоящее время ирригационными системами низовьев Амударьи орошается 457 тыс. га, в том числе в Узбекской ССР 330 и Туркменской — 127 тыс. га. Свободный земельный

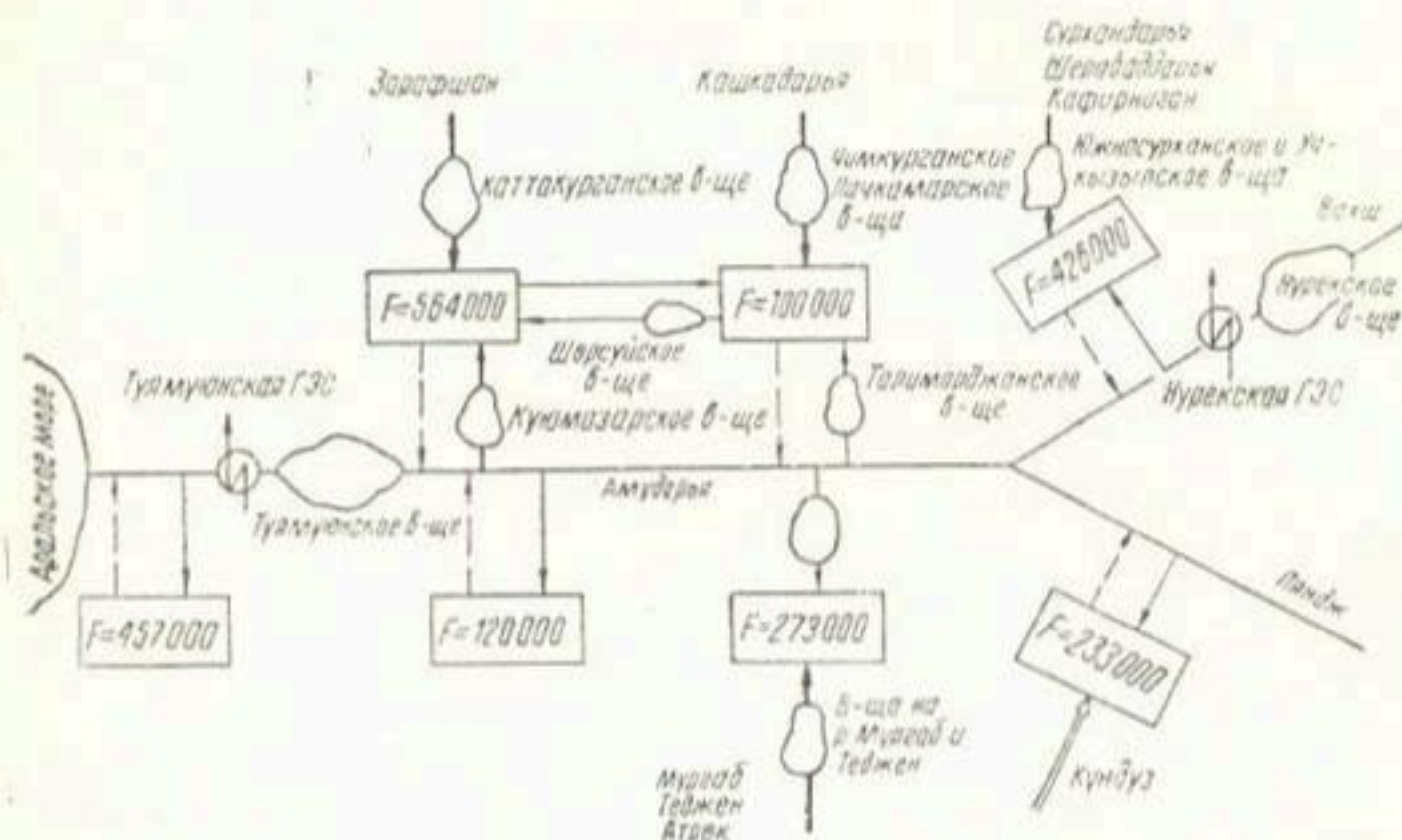


Рис. 2. Упрощенная линейная схема Амударьинской ВХС.

фонд, пригодный для орошения, превышает 1,5 млн. га. Дальнейшее развитие орошения в этих районах определяется водными ресурсами Амударьи, сокращающимися из года в год в связи с их разбором на поливы в среднем и верхнем течении реки. К 1980 г. намечается освоение новых земель в низовьях Амударьи в размере 500—600 тыс. га. Для этой цели начато строительство двух крупных гидротехнических сооружений на Амударье — Тахнаташской плотины и Туямуянского гидроузла с водохранилищем (полезной емкостью 5,3 млрд. м³) и с гидроэлектростанцией (установленной мощностью 100 тыс. кВт). Сооружение этих двух гидроузлов коренным образом улучшит условия водозабора во все существующие и вновь строящиеся ирригационные системы низовьев Амударьи.

Упрощенную линейную схему будущей единой Амударьинской ВХС можно представить в виде, изображенном на рис. 2.

К 1980 г. система будет иметь в своем составе (ориентировочно): разветвленную речную сеть со среднегодовым стоком воды $79,4 \text{ км}^3$; многочисленные водозаборные узлы, насосные станции и широкую сеть оросительных каналов; орошаемые земли площадью свыше 5 млн. га; обширную систему коллекторно-дренажных и сбросных каналов; 25 водохранилищ с суммарной полезной емкостью 30 км^3 ; шесть гидроэлектростанций с установленной суммарной мощностью 6,3 млн. кВт; водозаборные узлы для коммунально-бытового и промышленного водоснабжения.

* * *

На основе анализа современного состояния и перспектив развития Сырдарьинской и Амударьинской ВХС сформулируем задачи исследования:

- оптимальное размещение перспективных орошаемых земель в пределах ВХС с учетом их природно-экономических особенностей и комплексного характера использования водных ресурсов;

- определение оптимальных объемов регулирования стока рек и рациональное размещение водохранилищ в пределах ВХС с учетом топографии местности;

- технико-экономическое обоснование и расчет рациональных пределов использования гидроэнергетического потенциала рек; оптимальное размещение гидроэлектрических станций в пределах ВХС;

- разработка рекомендаций по минимизации непроизводительных потерь водных ресурсов ВХС;

- расчет оросительной способности водных источников ВХС для заданной обеспеченности ирригации;

- определение оптимальных пределов развития ВХС;

- прогноз колебания уровня Аральского моря;

- оптимизация режима работы ГЭС, входящих в ВХС;

- разработка правил оптимального управления режимом работы ВХС.

Глава II

ВОДНЫЙ БАЛАНС ОРОШАЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ

Водный баланс любой территории складывается главным образом под влиянием климатических факторов. Так, в условиях горных и высокогорных районов Средней Азии атмосферные осадки значительно превышают испарение с этой территории. В результате в этой зоне складывается положительный водный баланс и образуется сток рек. В равнинных районах Средней Азии атмосферные осадки выпадают в заметно меньших размерах по сравнению с потенциально возможным испарением. Здесь складывается в целом отрицательный водный баланс. По этим признакам В. Л. Шульц (1965) назвал горную зону зоной формирования стока, а равнинную — зоной рассеивания стока.

На формирование водного баланса может существенно повлиять деятельность человека. Наиболее ярко это влияние проявляется в зоне рассеивания стока. Тут сток рек перераспределяется по территории с помощью искусственно создаваемой гидрографической сети и во времени — посредством водохранилищ. Водохранилища, аккумулируя сток рек, с одной стороны, создают дополнительные испаряющие поверхности, приводящие к непроизводительным потерям стока, с другой, срезая пики паводковых расходов рек, ликвидируют разливы и, соответственно, непроизводительные потери стока в этих разливах и в поймах.

Освоение и орошение крупных массивов целинных земель, сопровождающиеся строительством широкой, разветвленной сети оросительных и коллекторно-дренажных систем, коренным образом преобразует естественный водный баланс территории. Ликвидация дикой растительности, обработка почв, создание коллекторно-дренажной сети способствуют повышению эффективности атмосферных осадков, выпадающих на орошаемую территорию; фильтрация оросительных вод из каналов и с полей приводит в одном случае к повышению

уровня грунтовых вод, сопровождающемуся подземной аккумуляцией оросительных вод, в другом — к формированию возвратных вод; возвратные воды, попадая в источники орошения, оказывают определенное влияние на режим рек и водохранилищ; коллекторно-дренажные системы в отдельных случаях способствуют использованию запасов грунтовых вод для орошения и т. д.

Целенаправленное преобразование естественного водного баланса территории, диктуемое интересами орошаемого земледелия, можно осуществить наиболее рационально только на основе отыскания оптимальных значений элементов водного баланса в данных природных условиях.

Водный баланс поля

Если принять за расчетный период один календарный год, то уравнение водного баланса ограниченного участка орошаемой территории будет иметь вид

$$Y_n + x + V_n = E + Y_0 + V_0 \pm \Delta W, \quad (1)$$

где

- Y_n — суммарный поверхностный приток;
- x — сумма атмосферных осадков;
- V_n — суммарный подземный приток;
- E — суммарное испарение;
- Y_0 — суммарный поверхностный отток;
- V_0 — суммарный подземный отток;
- ΔW — изменение запасов влаги в зоне аэрации.

В зависимости от гидрогеологических и мелиоративных условий орошаемого массива меняется структура уравнения (1). Так, при глубоком залегании уровня грунтовых вод и отсутствии естественного оттока для них уравнение водного баланса можно представить как

$$Y_n + x = E + Y_0 + \Delta V \pm \Delta W, \quad (2)$$

где ΔV — изменение запасов грунтовых вод.

При глубоком залегании уровня грунтовых вод с естественным оттоком, а также при близком залегании уровня минерализованных грунтовых вод в сочетании с искусственным оттоком (коллекторно-дренажная сеть)

$$Y_n + x = E + Y_0 + V_0 \pm \Delta W. \quad (3)$$

При близком залегании уровня пресных грунтовых вод

$$Y_n + x = E + Y_0 - \Delta V \pm \Delta W. \quad (4)$$

Случай близкого залегания уровня минерализованных грунтовых вод при отсутствии оттока не рассматривается, так как такие земли — обычно засоленные и не пригодны для использования без проведения соответствующих мелиоративных мероприятий.

Для районов орошаемого земледелия с точки зрения расходования воды характерным является вегетационный период. Перепишем уравнения (2, 3, 4) применительно к этому периоду. При этом учтем, что атмосферные осадки, выпадающие на орошаемую территорию в аридной зоне, по величине незначительны, а по внутригодовому распределению не благоприятны для ирригации. В отдельные годы и в некоторых районах предгорий они могут быть эффективными для ирригации с точки зрения увеличения ΔW к началу вегетационного периода, или с точки зрения увеличения общих водных ресурсов орошаемой территории (более подробно об этом будет сказано в разделе об осадках).

Обычно в приходной части уравнения водного баланса орошаемого массива атмосферные осадки в вегетационный период как отдельная статья не учитываются.

Далее, при производстве поливов величина поверхностного оттока оросительной воды может быть доведена до нуля путем совершенствования способов и техники полива и рядом организационных мер. Поэтому в расходной части уравнения эту статью также можно не принимать во внимание.

Таким образом, уравнения (2), (3), (4) будут иметь вид:

$$Y_{п. в} = E_v + \Delta V_v \pm \Delta W_v; \quad (5)$$

$$Y_{п. в} = E_v + V_{о. в} \pm \Delta W_v; \quad (6)$$

$$Y_{п. в} = E_v - \Delta V_v \pm \Delta W_v, \quad (7)$$

где $Y_{п. в}$ — суммарный поверхностный приток воды на орошаемый массив в течение вегетационного периода;

E_v — суммарное испарение за вегетационный период;

ΔV_v — изменение запасов грунтовых вод в течение вегетационного периода;

ΔW_v — изменение запасов влаги в зоне аэрации в течение вегетационного периода.

Суммарное испарение за вегетационный период E_v состо-

ит из двух частей — физического и физиологического испарения:

$$E_v = T_v + I_v.$$

Физическим испарением (I_v) называется испарение влаги из почвы без участия растений, физиологическим или транспирацией (T_v) — процесс испарения из листьев и других органов растений влаги, извлекаемой ими из почвы.

Знак «+» перед ΔV_v в уравнении (5) означает увеличение запасов грунтовых вод, а знак «—» в уравнении (7) — уменьшение запасов грунтовых вод или использование подземных вод для орошения.

Увеличение запасов грунтовых вод в рассматриваемом случае происходит за счет просачивания в грунт (фильтрации) части оросительных вод. Если вместо термина «просачивание за пределы активного слоя почвы» (фильтрация) примем термин «дренирование», то $+\Delta V_v$ будет означать суммарный дренажный сток с орошаемого массива в течение вегетационного периода D_v .

Специальные воднобалансовые исследования, проведенные нами по Голодной степи, показали, что в процессе освоения и орошения целинных земель, где отсутствует естественный отток грунтовых вод, происходит подземная аккумуляция воды за счет D_v и частично — за счет фильтрации атмосферных осадков. Объем накопленной в Голодной степи воды за период с 1952 по 1966 гг. нами определен в размере 2,26 км³.

По-видимому, процесс подземной аккумуляции воды в Голодной степи будет продолжаться до тех пор, пока не установится стабильное положение уровня грунтовых вод, обусловливаемое работой коллекторно-дренажной сети.

Уменьшение запасов грунтовых вод происходит при субирригации, т. е. при покрытии части потребностей растений в воде за счет пресных грунтовых или подземных вод.

Обычно при составлении водохозяйственных балансов орошаемой территории подземный приток считают дополнительным водным ресурсом в том случае, если подземные воды формируются выше гидрометрических постов, замыкающих зону формирования поверхностного стока рек. Общее количество подземных вод, поступающих в Ферганскую долину минуя гидрометрические посты, составляет менее 1 км³ в год. По-видимому, источником формирования пресных грунтовых вод, используемых при субирригации, служит дренажный сток с вышележащих благоприятных в мелиоративном отношении земель. Тогда уравнение (7) можно рассматривать как частный случай уравнения (5).

Уместно вспомнить еще об одном виде ресурсов, который обнаружен нами при анализе водного баланса Ферганской долины в многолетнем разрезе.

Известно, что земли Центральной Ферганы длительное время служили местом разгрузки дренажных (фильтрационных) вод с окружающих орошаемых территорий. Отсутствие здесь естественного оттока привело к повышению уровня, а местами даже к выклиниванию грунтовых вод на дневную поверхность и образованию соленых озер. Массовое строительство коллекторно-дренажной сети (с 1945 по 1960 гг. протяженность ее в Ферганской долине увеличилась вдвое) позволило резко улучшить мелiorативное состояние этих земель за счет отвода и снижения уровня грунтовых вод. Дополнительные водные ресурсы, полученные за счет сработки многолетних запасов этих грунтовых вод — с 1945 по 1954 гг., — по нашим расчетам, составляют 3,21 км³.

Из сказанного вытекает, что при составлении водного баланса орошаемой территории необходимо учитывать как возможную подземную аккумуляцию водных ресурсов при орошении новых земель, так и возможную сработку запасов грунтовых вод при строительстве коллекторно-дренажных сооружений.

Влажность почвы за вегетационный период в результате поливов меняется неоднократно от полной влагоемкости после полива до влажности разрыва капилляров (ВРК) перед поливом. Однако результирующее значение ΔW_n с некоторой степенью допущения можно считать равным нулю.

Изменение запасов влаги в зоне аэрации, зависящее от эффективности атмосферных осадков, поливов в невегетационный период (влагозарядковые, предпосевные, промывные и другие) и климатических факторов, к началу вегетационного периода определенным образом сказывается на значении U_n , и это учитывается уравнением (1).

Таким образом, значение $U_{n.в}$ определяется в основном тремя факторами: расходом воды на физическое испарение I_n , транспирацию T_n и дренаж (фильтрацию) D_n , т. е.

$$U_{n.в} = I_n + T_n + D_n. \quad (8)$$

Все элементы этого уравнения исчисляются в миллиметрах слоя воды, отнесенного к единице орошаемой площади.

Удельное значение $U_{n.в}$, т. е. общее количество воды, подаваемое на 1 га орошаемой площади в течение вегетационного периода, в практике орошаемого земледелия называют оросительной нормой. В понятие оросительной нормы разные авторы вкладывают разное содержание. Формулировка термина «оросительная норма» в литературных источни-

ках дается нечетко, расплывчато. Внесем некоторые уточнения.

Проанализируем несколько формулировок, которые встречаются в литературных источниках:

1. «Оросительная норма — количество воды в $\text{м}^3/\text{га}$, подаваемое за период вегетации для культуры» (Чуприн и др., 1967).

2. «Оросительная норма — общее потребление воды растениями за период вегетации» (Рыжов, 1948).

3. «Общее количество воды, подаваемое на гектар несколькими поливами, составляет оросительную норму» (Костяков, 1960).

Если в формулировках 1 и 2 под оросительной нормой понимать общее количество воды, подаваемое за период вегетации для удовлетворения физиологической потребности растений, то эта норма будет соответствовать удельному значению транспирации (T_n в уравнении (8)); если же иметь в виду и условия доступности влаги в почве для растений, то эта норма будет соответствовать удельному значению суммарного испарения ($I_n + T_n$ в уравнении (8)). В формулировке 3, если под оросительной нормой понимать общее количество воды, подаваемое на гектар несколькими поливами в течение года, норма будет соответствовать удельному значению U_n в уравнении (1); если принимать во внимание только вегетационные поливы, норма будет соответствовать удельному значению $U_{n.в}$ в уравнении (8) и т. д.

Итак, под оросительной нормой следует понимать общее количество воды, подаваемое на гектар орошаемой площади в течение вегетационного периода с целью поддержания оптимального для растений увлажнения и потенциального плодородия почвы.

В отличие от оросительной нормы, необходимо ввести понятие «норма водоподачи на орошаемое поле», под которой следует понимать общее количество воды, подаваемое на один гектар орошаемой площади в течение всего года с целью создания и поддержания оптимального для растений увлажнения и плодородия почвы.

Перейдем к анализу элементов водного баланса орошаемой территории.

Поливная норма

Известно, что получение высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур в любой природной зоне возможно только при хорошей влагообеспеченности растений и поддержании влажности и плодородия почвы на оптимальном уровне.

В засушливых районах увлажнение почвы обеспечивается искусственным орошением. При орошаемом земледелии практически можно создать любую влажность почвы. Сложность проблемы орошения заключается в определении оптимальной влажности, которую необходимо поддерживать в почве в период вегетации растений для создания нормального водно-воздушного, теплового, питательного, микробиологического и других режимов, т. е. для обеспечения нормальной жизнедеятельности возделываемых культур при данных климатических и почвенных условиях.

Теоретически установлено, что верхней границей оптимальной влажности почвы служит наименьшая (или предельная полевая) влагоемкость (НВ). Она определяется водно-физическими свойствами почвы и характеризует максимальные запасы воды, удерживаемые почвой в подвешенном состоянии. Нижняя граница обусловлена доступностью почвенной влаги растениям и зависит от соотношения между сосущей силой корневых клеток и силой, удерживающей влагу в почве.

Сосущая сила корневых клеток имеет очень сложную природу. Долгое время считалось, что эта сила есть проявление осмотического давления клеточного сока (Роде, 1952, 1960; «Растение и вода», 1967). При этом процесс движения влаги по системе почва — растение — атмосфера исследователи стремились объяснить на основе физических законов диффузии и осмоса. Последующие работы, преимущественно советских ученых, показали ограниченность такого представления и необходимость изучения этого процесса с точки зрения также коллоидной химии и биохимии (Алексеев, 1968). В таком аспекте сосущая сила корневых клеток выступает как интегральный показатель, выражающий итог взаимодействия всех осмотических, коллоидно-химических и биохимических процессов, влияющих на активность воды в клетке.

На сосущие силы растений и почвы влияют многие факторы; природа большинства из них изучена пока недостаточно. Функциональные зависимости между влажностью почвы и сосущими силами почвы и растений не определены. Поэтому установить аналитическим путем нижний предел оптимальной влажности почвы не представляется возможным.

Экспериментами найдено, что при снижении влажности почвы ниже ВРК резко понижается ее влагопроводность и подвижность почвенной влаги, в силу чего уменьшается и доступность последней для растений.

Количественная характеристика скорости передвижения влаги в зависимости от влажности почвы дана в работе С. И. Долгова (1948). Обстоятельные исследования по движению влаги в почве проведены многими советскими и за-

рубежными авторами (Роде, 1960; Секега, 1932 и др.). Установлено, что по мере стекания почвенной влаги при переходе из насыщенного состояния к НВ фильтрация влаги под действием силы тяжести заменяется чисто капиллярным передвижением. При дальнейшем уменьшении содержания влаги — до ВРК — передвижение ее совершается уже посредством пленочно-менискового механизма. При еще большем снижении влажности — до максимальной гигроскопичности — влага передвигается только под влиянием сил пленочного притяжения.

Опыты с растениями подтвердили, что при влажности почвы ниже ВРК существенно снижается урожай, значит, уменьшается доступность влаги. Поэтому иногда ВРК называют влажностью замедления роста растений или влажностью завядания. ВРК в почвах легкого механического состава несколько выше, чем в тяжелых почвах. При повышении температуры почвы ВРК уменьшается. Степень засоленности почвы также влияет на величину ВРК — при повышении засоленности ВРК возрастает. Аналогично действуют эти факторы и на НВ.

ВРК обычно выражается в процентах от НВ (она составляет примерно 65—75%), и такое соотношение можно считать постоянным в течение всего вегетационного периода.

Для хлопковой зоны Средней Азии рекомендуется величину ВРК, принимаемую за нижний предел оптимальной влажности почвы, устанавливать в размере 70% от НВ (Рыжов, 1964, 1968).

Таким образом, при искусственном орошении земель необходимо поддерживать влажность почвы в пределах НВ—ВРК. На практике это осуществляется периодическими вегетационными поливами; при снижении влажности почвы до ВРК производится очередной полив, с помощью которого влажность почвы повышается до НВ. В течение вегетационного периода этот процесс повторяется несколько раз.

Общее количество воды, которое необходимо для повышения влажности почвы от ВРК до НВ, назовем «мобильным» запасом воды в почве. В отличие от этого, общее количество воды, содержащееся в почве при ВРК, назовем «мертвым» запасом воды в почве, так как при нормальном режиме орошения этот запас воды в течение всего вегетационного периода остается нетронутым. Заметим, однако, что «мертвым запасом воды» Лобанов (1925, 1926) называл количество воды, содержащееся в почве при влажности, равной или близкой к максимальной гигроскопичности. При этом имелось в виду, что растения некоторое время могут продолжать жить и транспирировать воду даже при остром недостатке влаги в почве, т. е. при влажности, равной и да-

же несколько меньшей ВРК; а окончательная гибель растений, невозстановливаемость его последующими поливами, наступает при влажности, равной максимальной гигроскопичности.

Вегетационные поливы восстанавливают только «мобильные» запасы воды в почве, которые расходуются в межполивной период на транспирацию и физическое испарение.

„Мобильный“ запас воды в слое почвы мощностью H_m на площади в 1 га может быть рассчитан по формуле Костякова (1960)

$$W_m = W_k - W_n = HA\gamma \text{ м}^3/\text{га},$$

где W_k — общее количество воды в почве при НВ;

W_n — общее количество воды в почве при ВРК;

H — расчетная глубина промачивания почвы, м;

A — скважность почвы, определяемая опытным путем;

γ — разность между НВ и ВРК, % от скважности.

Очень часто «мобильный» запас воды в расчетном слое почвы на площади 1 га приравнивается к поливной норме. Между тем от вегетационных поливов в аридной зоне требуется не только восстановление «мобильных» запасов воды в почве, но и поддержание потенциального плодородия самой почвы.

Известно, что в засушливой зоне при искусственном орошении земель происходит непрерывное поступление солей в почву вследствие минерализации оросительной воды, влагообмена между почвой и грунтом и микробиологических процессов, происходящих в почве при ее увлажнении.

Движение влаги по системе почва — растение — атмосфера сопровождается концентрацией солей у поверхности почвы в результате физического испарения и в пределах корневой зоны растений в результате поглощения воды корнями.

Положительный солевой баланс в конце концов должен привести к реставрации засоления (вторичному засолению) орошаемых земель с полной потерей потенциального плодородия почв и с выпадом их из сельскохозяйственного оборота.

Для поддержания при орошении потенциального плодородия почв необходимо обеспечивать отрицательный солевой баланс, т. е. систематически удалять соли из активного слоя почвы. Одним из эффективных и широко применяемых на практике способов решения этой задачи является дренаж.

Более подробно дренаж будет рассмотрен ниже. Сейчас отметим лишь, что для образования дренажного стока необходимо профильтровать через активный слой почвы опреде-

ленное количество воды. Причем, фильтрационный поток образуется в почве только после полного ее насыщения влагой. Следовательно, поливная норма должна состоять из двух частей: первая — количество воды, которое идет на покрытие потребности растений, вторая — количество воды, необходимое на покрытие потребности самой почвы, т. е. на создание в ней солевой вентиляции. К этому необходимо добавить суммарное испарение с орошаемого поля в период проведения поливов E_n' и испарение с свободной водной поверхности за тот же период (I_v').

Таким образом, формула для определения поливной нормы будет иметь вид

$$П = W_m + E_n' + I_v' + д, \quad (9)$$

где $д$ — дренажный модуль, определяемый расчетным путем, $м^3/га$.

Максимальный запас воды, удерживаемый почвой в подвешенном состоянии, регулируется прежде всего свойством самой почвы — ее потенциальной полевой (наименьшей) влагоемкостью.

Если есть условия для оттока дренажных вод, то через некоторое время после полива в почве автоматически устанавливается НВ, так как вся излишняя влага под действием силы тяжести стекает в дренажную сеть и выносится за пределы активного слоя почвы. В данном случае исправно работающая дренажная сеть выступает как обратная связь системы почва — растение — атмосфера, автоматически исключая переувлажнение почвы при поливах. Это обстоятельство значительно облегчает увлажнение почвы при поливах до верхнего предела оптимальной влажности. Гораздо труднее установить нижний предел оптимальной влажности почвы, т. е. момент, когда необходимо проводить очередной полив. Прямые методы измерения влажности почвы трудоемки, требуют специальных знаний и применения лабораторного оборудования и к тому же не дают желаемых результатов, так как содержание влаги в почве сильно варьирует по площади, глубине и во времени. Не создано пока достаточно удобных для практического применения и надежных в эксплуатации измерительных приборов, позволяющих производить даже точечные замеры влажности почвы в полевых условиях.

Тем не менее, в США широко применяют прямые методы измерения влажности почвы для определения сроков поливов. В качестве измерительной аппаратуры там используют несколько типов тонзиометров, принципиально мало отличных друг от друга.

Обычно устанавливают по одному, два или три тонзиометра на поля или части полей, различные по почвам, культурам, рельефу, способу и режиму орошения и т. д. Тонзиометры располагают, как правило, по два-три вместе. Если мощность активного слоя почвы меньше 45 см, используется один тонзиометр, устанавливаемый на глубине 30 см, если более 45 см — два; при глубине активного слоя почвы более 1,2 м применяют три тонзиометра. Иногда одновременно устанавливают два прибора — тонзиометр и пористый блок-сопротивление. Они удачно дополняют один другой, поскольку нижний порог чувствительности блок-сопротивления почти соответствует верхнему пределу чувствительности тонзиометра. Датчики обоих приборов рекомендуется располагать в зоне наибольшей корневой активности (Маслов, Нестеров, 1967).

При снижении влажности почвы до ВРК в качестве обратной связи системы выступает реакция растений. Эта реакция трудно поддается инструментальному учету. Однако разработано много методов определения сроков поливов, учитывающих в той или иной мере реакцию растения. Они основаны на очень тонких и глубоких научных экспериментах и представляют несомненный интерес с точки зрения выявления механизма взаимодействия растений и среды. Значительная часть этих экспериментов проведена для локальных условий и поэтому вытекающие из них выводы существенно искажаются при экстраполяции на другие условия. К тому же методы сложны для практического применения.

Проще и удобнее определять сроки полива по показателям внешних признаков состояния растений — окраске листьев, частичной потере тургора в жаркие часы дня, темпам прироста главного стебля, высоте узла цветения и т. д. Однако в связи с тем, что состояние растений обычно определяется на глаз, сроки поливов устанавливаются весьма приблизительно; здесь немаловажную роль играют опыт и интуиция поливальщиков. Для подтверждения сказанного приведем две рекомендации («Орошаемое земледелие», 1965): «Если горсть земли, взятая из самой нижней части пахотного слоя, сжимается в кулаке, но не мажется, а слабо крошится, то при таком состоянии влажности нужно производить полив». «Назначать полив нужно в самом начале слабого подвядания листьев на небольшой части растений, примерно на 25% от их общего числа».

Разработка и внедрение более обоснованных и универсальных методов определения сроков поливов способствовали бы оптимизации режима орошения и рациональному использованию оросительной воды.

Поливные нормы можно рассчитать по уравнению (9). Они изменчивы во времени, поскольку в зависимости от фазы развития растений меняются потребности в воде, расчетная глубина промачивания почвы (H), абсолютные значения $HВ—ВРК$ и величина дренажного модуля.

Сроки поливов и общее количество поливов за весь вегетационный период зависят от динамики расходования «мобильных» запасов влаги в почве, создаваемых предыдущими поливами.

Суммарное испарение

Суммарное испарение с орошаемого поля складывается из физического и физиологического. Физиологическое испарение (транспирация) является продуктивным расходом влаги, а физическое (испарение с почвы) — непродуктивным, непроизводительным ее расходом. Следовательно, наиболее важный компонент водного баланса орошаемой территории — транспирация, ибо ею по существу определяется потребность растений в воде. Установлено, что из общего количества воды, извлекаемой растениями в течение вегетационного периода из почвы при нормальной водообеспеченности, только 0,15—0,20% усваиваются растениями, а остальные 99,8—99,85% расходуются на транспирацию. Таким образом, величину транспирации можно принять за потребность растений в воде. Отношение веса воды, транспирируемой растением за вегетационный период (T_v), к весу сухого вещества (y), накопленного им за тот же период, принято называть коэффициентом транспирации:

$$k_T = \frac{T_v}{y}, \text{ или } T_v = k_T y.$$

Коэффициент транспирации различен для разных растений и изменяется в широком диапазоне — на десятки и сотни процентов (Алпатьев, 1954) — даже для одного и того же растения в зависимости от уровня агротехники. Это обстоятельство затрудняет применение приведенной зависимости для расчета потребности растений в воде. Для стабильных условий агротехники и заданного урожая по этой зависимости можно рассчитать суммарное водопотребление растений за весь вегетационный период. Однако такой интегральный показатель не может характеризовать динамику водопотребления растений во времени, знать которую крайне необходимо при расчете режима орошения, ибо отношение расхода воды к приросту вегетативной массы не остается постоянным по мере роста и развития растений (Константинов, 1968).

Выше уже говорилось, что удовлетворение потребностей растений в воде зависит от влажности почвы и что при поддержании вегетационными поливами влажности почвы в интервале НВ—ВРК условия водообеспеченности растений всегда будут оптимальными. Следовательно, в районах орошаемого земледелия, где растения в течение всего вегетационного периода обеспечиваются «мобильными» запасами воды в почве, величина транспирации зависит, главным образом, от трех факторов: видового и сортового состава возделываемых культур, их возраста и комплекса метеорологических условий. Эти факторы взаимосвязанны и взаимозависимы, и процесс транспирации есть результат их взаимодействия. Закономерности такого взаимодействия, в основе которых лежат не только физические, но также сложные физиологические, биохимические и другие процессы, изучены еще недостаточно. Поэтому пока не представляется возможным определить величину транспирации расчетным (аналитическим) путем.

Предложены многочисленные эмпирические способы и методы определения величины транспирации. Они достаточно подробно описаны в литературе (Будыко с сотр., 1954; Будаговский, 1957; Константинов, 1968; Алпатьев, 1961 и т. д.).

Мы ограничиваем свою задачу рамками определения величины суммарного испарения с орошаемого поля при оптимальной водообеспеченности возделываемых культур.

При колебании влажности почвы в пределах НВ—ВРК величина физического испарения определяется только климатическими факторами и состоянием испаряющей поверхности. Если процесс испарения с почвы рассматривать изолированно и при этом считать, что на испаряющую поверхность не оказывается никакое воздействие, то величину физического испарения можно было бы определить из уравнения теплового баланса. Однако на орошаемых массивах физическое испарение протекает совместно с транспирацией. Общая закономерность, управляющая соотношением этих двух процессов, заключается в том, что по мере роста и развития возделываемых культур и в зависимости от густоты их насаждения увеличивается затененность поверхности почвы, что сопровождается постепенным снижением величины и скорости физического испарения и повышением величины транспирации.

В СоюзНИХИ на основании экспериментов на орошаемом хлопковом поле установлено следующее соотношение между этими двумя составляющими суммарного испарения в зависимости от фазы развития растений: до цветения физическое испарение равно 60—65% от общего водопотреб-

ления за данную фазу, а транспирация 35—40%; в фазу цветения 25—30 и 70—75% соответственно и в фазу созревания 20—25 и 70—80%. В общей сложности в течение всего вегетационного периода физическое испарение составляет 30—35%, а транспирация 65—70% от суммарного испарения.

Можно констатировать, что при современном уровне агротехники на хлопковом поле в условиях Средней Азии в течение вегетационного периода безвозвратно (непродуктивно) теряется на физическое испарение 30—35% оросительной воды. Между тем, эти потери отнюдь не неизбежны, с ними можно и нужно бороться, однако еще не найдены достаточно эффективные способы борьбы. Отсюда следует, что сокращение расхода влаги на физическое испарение с орошаемой территории представляет собой огромный резерв повышения степени использования оросительной воды. Реализация этого резерва может быть осуществлена по двум направлениям: путем сокращения периода, в течение которого производятся поливы, и путем воздействия на испаряющую поверхность почвы в межполивной период.

Как известно, при искусственном орошении земель поливы осуществляются периодически, т. е. полив является дискретным процессом, а расходование почвенной влаги — непрерывным процессом.

При поливе наиболее распространенным в Средней Азии бороздковым способом оросительная вода расходуется, помимо суммарного испарения, еще и на испарение с водной поверхности.

Организация круглосуточного полива (что широко практикуется в передовых хозяйствах) с одной стороны, сокращает общую продолжительность поливного периода, с другой — резко уменьшает физическое испарение, которое в ночные часы минимально.

Послеполивная обработка почвы, изменяя агрегатное состояние поверхностного слоя и разрушая капиллярные связи, препятствует подтягиванию почвенной влаги к испаряющей поверхности и тем самым способствует снижению физического испарения. Все способы уменьшения величины физического испарения (совершенствование техники и способов полива, тщательная планировка полей, глубокая и высококачественная обработка, рыхление почвы после поливов и т. д.) позволяют удлинять межполивной период и снижать общее расходование воды на орошение.

В связи с систематическим и интенсивным ростом водотбора на ирригацию необходимо широко использовать в практике орошения уже разработанные методы борьбы с непродуктивными потерями влаги на физическое испарение

с орошаемых территорий, а также продолжить дальнейшее совершенствование этих методов.

Абсолютная величина суммарного испарения с орошаемого участка земли в межполивной период при отсутствии атмосферных осадков обычно равна общему количеству «мобильных» запасов влаги в расчетном слое почвы.

Атмосферные осадки, если они выпадают в межполивной период, также могут быть учтены при определении величины суммарного испарения в зависимости от их ирригационной эффективности.

Следовательно, для определения величины суммарного испарения с орошаемой территории нет необходимости прибегать, как рекомендуют некоторые авторы (Константинов, 1968, Харченко, 1968), к решению уравнения водного баланса.

Для расчета режима орошения и определения оросительной нормы необходимо знать, помимо абсолютной величины суммарного испарения, динамику расходования оросительной воды во времени.

Широко применяемые экспериментальные методы определения суммарного испарения в естественных условиях по испарителям и лизиметрам дают сравнительно достоверные сведения о динамике расходования почвенной влаги на небольшом участке орошаемой территории. Однако эти сведения отражают конкретные природные условия, которые сложились на данном участке орошаемой территории в период проведения экспериментов. Чтобы получить достоверные сведения, характерные хотя бы для средних климатических условий данного района, необходим длительный ряд наблюдений. С другой стороны, ввиду пространственной изменчивости факторов, обуславливающих суммарное испарение, экстраполяция результатов точечных измерений на большую территорию дает сильно искаженные результаты.

Что касается метода турбулентной диффузии (градиентного метода), то в настоящее время после достаточно длительных его испытаний для расчета испарения в естественных условиях, в том числе и на орошаемых землях, подавляющее большинство исследователей пришло к выводу, что этот метод еще не пригоден для массовых измерений (Харченко, 1968).

Из всех существующих методов определения испарения в естественных условиях наиболее приемлем, по-видимому, метод теплового баланса. Рассмотрим его более подробно. Для практических расчетов уравнение теплового баланса деятельной поверхности за определенный отрезок времени можно записать как

$$R = P + B + V, \quad (10)$$

где R — радиационный баланс;
 P — турбулентный теплообмен с воздухом;
 B — поток тепла в почву;
 V — затраты тепла на суммарное испарение.

В уравнении (10) все члены баланса характеризуют сумму тепла за рассматриваемое время.

Величина радиационного баланса за вегетационный период равна разности солнечной радиации, поглощенной подстилающей земной поверхностью, и эффективного излучения за тот же период, т. е.

$$R = (Q + q)(1 - \alpha) - J, \quad (11)$$

где Q — сумма прямой радиации;
 q — сумма рассеянной радиации;
 α — альбедо;
 J — эффективное излучение (разность между приходом и расходом тепла на подстилающей поверхности, обусловленная собственным излучением поверхности и противоизлучением атмосферы).

В течение вегетационного периода в результате периодических поливов, роста и развития вегетативной массы возделываемых культур меняется характер подстилающей поверхности, наблюдается перераспределение в соотношении составляющих теплового баланса, что влияет на формирование микроклимата орошаемой территории.

Изменения в характере подстилающей поверхности приводят к уменьшению величины α . Периодические поливы снижают температуру и повышают влажность приземного слоя воздуха, что в свою очередь обуславливает снижение величины эффективного излучения.

С уменьшением величин α и J существенно возрастает радиационный баланс. Этот факт был замечен впервые А. А. Скворцовым (1928).

Значения P и V можно определить исходя из следующих зависимостей:

$$P = \rho C_p k_a \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad (12)$$

$$V = LE = L\rho k_a \frac{\partial q}{\partial z}, \quad (13)$$

где ρ — плотность воздуха;
 C_p — теплоемкость воздуха при постоянном давлении;
 k_a — коэффициент турбулентного обмена;
 $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ — вертикальный градиент абсолютной температуры воздуха;

$\frac{\partial q}{\partial z}$ — вертикальный градиент удельной влажности { воздуха;

L — скрытая теплота испарения;

E — величина испарения.

Скрытая теплота испарения в природных условиях изменчива, она зависит от температуры испаряющей поверхности, и эта зависимость имеет вид

$$L = 597 - 0,6\theta, \text{ кал/г} \quad (14)$$

(θ — температура воздуха).

Решая совместно уравнения (10), (12) и (13), подставляя значение L из равенства (14) и проинтегрировав по z , получаем

$$E = \frac{R - B}{(597 - 0,6\theta) + C_p \frac{\theta_1 - \theta_2}{q_1 - q_2}}, \quad (15)$$

где $\theta_1 - \theta_2$ и $q_1 - q_2$ есть разности температур и удельных влажностей на двух высотах соответственно.

Уравнение (15), если имеется достоверная информация, позволяет довольно точно определить величину суммарного испарения с орошаемого поля за расчетный интервал времени в течение вегетационного периода.

Наиболее достоверную информацию можно получить по материалам экспедиционных наблюдений.

В наших исследованиях в Голодной степи (совхозы № 6, 7 и 18) величина радиационного баланса измерялась балансометром, потоки тепла в почву рассчитывались по методу Цейтина (1956) с использованием данных о распределении температуры почвы по глубине; турбулентный теплообмен с воздухом и затраты тепла на суммарное испарение рассчитывались по результатам градиентных и актинометрических наблюдений по методу теплового баланса.

Решая уравнение (15) относительно суточного интервала времени, можно составить интегральную кривую суммарного испарения с орошаемого поля во времени. Время, в течение которого суммарное испарение достигает величины, соответствующей «мобильному» запасу влаги в расчетном слое почвы, и будет равняться межполивному периоду. Тут следует подчеркнуть, что для небольших интервалов времени точность уравнения (15) ограничена точностью измерения элементов теплового, в частности радиационного баланса.

Уравнение (15) иногда рассматривают в упрощенном виде для определения испаряемости:

$$E_0 = \frac{R_0}{597 - 0,6\theta},$$

где R_0 — максимальная величина радиационного баланса при данной суммарной солнечной радиации.

Под испаряемостью обычно понимают потенциально возможное испарение с подстилающей поверхности при данных метеорологических условиях, т. е. максимально возможное испарение в природе при неограниченных влаготасах испаряющей поверхности.

К метеорологическим факторам, влияющим на испаряемость, относятся дефицит влажности воздуха, теплоэнергетический баланс испаряющей поверхности и интенсивность турбулентного влаготбмена в приземном слое атмосферы. Величина испаряемости выступает как интегральное выражение действия этих природных факторов. Поэтому некоторые исследователи (Докучаев, 1948; Высоцкий, 1905; Transeau, 1905; Penck, 1910) использовали испаряемость для количественной характеристики климатических условий различных географических зон.

Для определения испаряемости предложен ряд эмпирических формул. Их можно разделить на две группы. К первой относятся зависимости типа

$$E_0 = f(d); \quad E_0 = \varphi(t),$$

где d — дефицит влажности воздуха;

t — температура воздуха.

Это — формулы Ольдекопа (1911), Майера (Mayer, 1928), Кузина (1938), Альбрехта (Albrecht, 1950), Будаговского (1957, 1965), Савиной (1960) и др., где испаряемость связана с дефицитом влажности воздуха, а также Лауга (Lang, 1920), Мартона (Marlonn, 1926), Селянинова (1930, 1937), Полякова (1947) и др., где испаряемость рассматривается в зависимости от температуры воздуха. В данных формулах при определении величины испаряемости учитывается в явном виде влияние только одного из трех перечисленных метеорологических факторов. Такой прием в принципе возможен потому, что все эти факторы в природе взаимосвязанны и взаимообусловлены и при учете одного из них влияние остальных через его посредство сказывается в неявном виде.

Ко второй группе относятся зависимости типа

$$E_0 = f_1(d, t); \quad E_0 = f_3(d, R);$$

$$E_0 = f_2(e, t); \quad E_0 = f_4(e, u)$$

и т. д.,

где e — относительная влажность воздуха;

u — скорость ветра;
 R — радиационный баланс.

Авторы этих формул — Иванов (1948, 1954), Зайков (1949), Прескотт (Prescott, 1931), Будыко (1956), Константинов (1962) и другие. Они при определении величин испаряемости учитывают в явном виде влияние уже двух из трех метеорологических факторов. По-видимому, точность этих формул несколько выше.

По всем приведенным эмпирическим формулам можно рассчитывать величину испаряемости только с свободной водной поверхности и с предельно увлажненной поверхности почвы, так как только в этих случаях испаряемость зависит от одних лишь метеорологических условий. Когда же поверхность почвы покрыта растительностью, необходимо, помимо влияния метеорологических факторов, принять во внимание также влияние самих растений, определяемое их биологическими свойствами.

Возникает принципиальный вопрос: применим ли термин «испаряемость» к орошаемым землям, где возделываются сельскохозяйственные культуры?

Как уже говорилось, суммарное испарение с орошаемых полей складывается из двух частей: из испарения с почвы и из транспирации растений. Испаряемость с почвы — это максимально возможное испарение с предельно увлажненной поверхности почвы при данных метеоусловиях; испаряемость с растений — максимальный расход воды на транспирацию при данных метеоусловиях и оптимальной водообеспеченности. Растения находятся в оптимальных условиях водообеспеченности при влажности почвы в пределах НВ—ВРК, а предельно увлажненная поверхность почвы имеет влажность, равную или выше НВ.

Таким образом, практически условия, обеспечивающие максимально возможное испарение и с почвы, и с растений, не могут иметь место одновременно. Поэтому термин «испаряемость», по-видимому, неприменим к орошаемым сельскохозяйственным полям.

Утверждения, что при влажности почвы, большей некоторого критического значения (ВРК), суммарное испарение с сельскохозяйственных полей E равно испаряемости E_0 (Будыко, 1956), лишены основания.

При влажности почвы, изменяющейся в пределах НВ—ВРК, транспирация растений максимальна (T_n), а для определения величины суммарного испарения с сельскохозяйственных полей (E) необходимо добавить к T_0 еще испарение I с почвы, покрытой растительностью. При этом I не будет иметь максимального значения, так как испаряющая поверхность почвы в той или иной степени затенена

растительностью и ее влагозапасы ограничены. Пренебрегать величиной I при определении суммарного испарения с орошаемого поля E , как правило, недопустимо, ибо испарение с почвы как в течение всего вегетационного периода, так и в отдельные фазы развития растений составляет значительную долю от суммарного испарения. Исключением является случай, когда поле покрыто «низкорослой зеленой культурой, полностью затеняющей почву, выровненной по высоте и не испытывающей недостатка в воде» (Penman, 1948). В этом случае $T_0 = E_0$.

Таким образом, в общем случае зависимости типа $E = f(E_0)$ не могут быть корректными.

Имеется ряд эмпирических формул для определения водопотребления растений при оптимальной влажности почвы, например Алпатьева (1961), Константинова (1968), Пенмана (Penman, 1956), Блейни и Кридла (Blaney, Criddle, 1950). В них учитываются, помимо климатических факторов, и биологические особенности возделываемых культур. Ошибочной является попытка применить эти формулы для определения оросительных норм и установления режима орошения сельскохозяйственных культур. Дело в том, что формулы выведены для определения водопотребления растений, характеризуемого величиной транспирации. Поливная же норма состоит из трех составляющих — транспирации, испарения с почвы и дренажного модуля. Рассчитывать поливные нормы исходя только из водопотребления растений значит преднамеренно занижать эти нормы.

Формулу Блейни и Кридла для определения транспирации в природных условиях применил Душин-Барковский (1956). Подчеркнем еще раз, что эта эмпирическая зависимость выведена для определения водопотребления растений, находящихся в оптимальных условиях водообеспеченности. Следовательно, для расчета транспирации в природных условиях, когда растения не всегда обеспечены оптимальными влагозапасами в почве, она неприменима.

В метрической системе формула Блейни и Кридла имеет вид:

$$E = 25,4 \frac{k_6 \text{ п } (1,8\theta + 32)}{100},$$

где E — месячная норма водопотребления растений, мм;
 п — продолжительность часов дневного времени в % от годовой их суммы (принимается в зависимости от широты местности и месяца);
 k_6 — биологический коэффициент водопотребления данной культуры за месяц;
 θ — среднемесячная температура воздуха.

Дренажный сток

Дренаж в орошаемом земледелии применялся с древнейших времен. Об этом свидетельствуют археологические раскопки в районах древнего Египта, Индии, Китая, Ассирии, Вавилона и т. д. В Средней Азии сохранились до наших дней местные наименования дренажных сооружений: «зауры» в Ферганской долине, «закеши» в Бухарском оазисе, «зах-арыки» в Ташкентской области и т. д.

К настоящему времени многочисленными научными исследованиями как в СССР, так и за рубежом твердо установлено, что потенциально высокое плодородие засоленных почв в орошаемом земледелии можно восстановить путем искусственного удаления солей и солевых растворов из корнеобитаемого слоя почв и грунтов с помощью дренажных сооружений разного типа (Ковда, 1947, 1954, 1956, 1958, 1967; Аверьянов, 1957, 1959; Рабочев, 1952, 1964, 1967; Розанов, 1958; Легостаев, 1953, 1957, 1959, 1968; Егоров, 1954, 1959 и др.). Многочисленные фактические материалы, убедительно подтверждающие это положение, можно найти в работах В. А. Ковды (1967), С. Ф. Аверьянова (1959), Ф. Н. Бончковского (1963), П. А. Керзум (1958), Н. М. Решеткиной (1960, 1966).

Как пример из практики орошения в Средней Азии рассмотрим Хорезмскую область Узбекской ССР. Здесь в 1947 г. урожайность хлопчатника была самой низкой в республике и составляла всего 6,7 ц/га при средней урожайности по Узбекистану в целом в 12,7 ц/га. В последующие годы было широко развернуто строительство коллекторно-дренажной сети. Удельная протяженность этой сети по Хорезмской области была доведена с 3,4 пог. м на 1 га в 1947 г. до 21,6 пог. м/га в 1966 г., т. е. увеличилась более чем в 6 раз. При этом урожайность хлопчатника по области выросла в 5,2 раза и достигла 35 ц/га при средней урожайности по Узбекистану в 25,1 ц/га.

В 1947 г. протяженность всех оросительных каналов Узбекистана (126,4 тыс. км) была в 5,6 раза больше, чем суммарная протяженность межхозяйственной и внутрихозяйственной коллекторно-дренажной сети (22,5 тыс. км). К 1966 г. это соотношение изменилось до 2, а по Хорезмской области до 1,3 раза.

Из истории ирригации Средней Азии известно, что в группе Кокандских районов Ферганской долины удельная протяженность заурной (дренажной) сети составляла около 200 пог. м/га. Такой же примерно была и удельная протяженность оросительной сети. При столь развитой дренажной сети засоление почв не проявлялось совершенно и районы по урожаю хлопка находились в числе первых по рес-

публике. С укрупнением поливных участков большая часть зауров-дрен была засыпана; земли этой группы районов стали выходить из строя вследствие засоления, и урожайность хлопчатника резко снизилась. Только теперь, с новым строительством коллекторно-дренажной сети, плодородие почв начинает восстанавливаться, а урожай — расти.

Теперь стало бесспорным положение о том, что при орошении земель в аридной зоне дренаж является неотъемлемой частью оросительной системы.

В «Технических указаниях по проектированию горизонтального дренажа засоленных земель» (1965) дается следующее определение понятия дренажа: «Дренаж является одной из составляющих комплекса мелиоративных мероприятий, направленных на устойчивое рассоление засоленных почв или на предупреждение вторичного засоления земель». И далее: «Дренажная система представляет собой совокупность гидротехнических сооружений и устройств (открытых или закрытых дрен, коллекторов, насосных станций и пр.), предназначенных для захвата и отвода минерализованных грунтовых вод с орошаемой территории». Такая, в принципе верная, постановка вопроса предусматривает только рациональное и полное использование земельного фонда, однако упускается из виду оптимальное использование водных ресурсов, как правило, дефицитных в районах искусственного орошения.

Исходя из приведенных определений понятия дренажа, вполне логичен отвод дренажных вод с орошаемых территорий Голодной степи в Арнасайскую впадину, в низовьях Амударьи — в Сарыкамышскую впадину, в низовьях Зарафшана — в Денгизкульскую впадину и т. д. Между тем, в настоящее время дренажный сток с орошаемой территории Средней Азии уже составляет более 10 км³ в год, что равноценно суммарным водным ресурсам двух относительно крупных рек Средней Азии — Чирчика и Зарафшана. В перспективе дренажный сток будет безусловно увеличиваться, ибо, с одной стороны, непрерывно растет удельная протяженность межхозяйственной и внутрихозяйственной коллекторно-дренажной сети на старопахотных землях, с другой — из года в год расширяется общая площадь орошаемых земель на территории Средней Азии за счет освоения новых земельных массивов, что сопровождается строительством разветвленной сети коллекторно-дренажных систем.

Таким образом, речь должна идти не только об отводе дренажных вод с орошаемой территории и последующем сбросе их в естественные впадины для безвозвратных потерь, но и об их сборе и сбросе в источники орошения для

повторного использования. Иначе говоря, в комплексе гидротехнических сооружений отводящей сети необходимо в обязательном порядке включить сбросные каналы, которые связывали бы сборные коллекторы с ближайшими источниками орошения.

Сбросные каналы необходимы и по другой причине. Установлено, что дренажные системы, выполняя функции захвата и отвода с орошаемой территории дренажного стока в период вегетационных, промывных и других поливов, способствуют формированию стока за счет интенсивно выпадающих на орошаемую территорию (преимущественно в не-вегетационный период) атмосферных осадков. В отдельные годы этот сток составляет довольно значительную величину, в чем можно было убедиться на примере 1969 г. Чем больше удельная протяженность коллекторно-дренажной сети, тем больше эффективная часть атмосферных осадков. Конечно, сбор и сброс в источники орошения — в составе так называемых «возвратных вод» с орошаемой территории — стока, формирующегося в коллекторно-дренажной сети за счет атмосферных осадков, представляет несомненный интерес. Однако в настоящее время количественно оценить этот сток затруднительно.

Резюмируя сказанное, можно предложить следующее определение функции дренажных систем: дренажные системы представляют собой совокупность гидротехнических сооружений и устройств (открытых или закрытых дрен, коллекторов, сбросных каналов, насосных станций и пр.), предназначенных для захвата и отвода дренажных вод с орошаемой территории и сброса их в ближайшие источники орошения.

При освоении засоленных и подверженных засолению орошаемых земель различают два основных периода: мелиоративный и эксплуатационный. Мелиоративный период является начальным этапом освоения земель, когда производится рассоление всей корнеобитаемой зоны почвы и верхних горизонтов грунтовых вод до требуемой концентрации. В эксплуатационный период осуществляется непрерывная «солевая вентиляция» орошаемой территории, исключая процессы соленакопления в активном слое почвы и обеспечивая последующее рассоление более глубоких горизонтов почв, грунтов и грунтовых вод.

Таким образом, коллекторно-дренажные системы в аридной зоне в мелиоративный период способствуют ликвидации первичного засоления осваиваемых земель, а в эксплуатационный период, продолжая процесс опреснения более глубоких слоев почво-грунтов, препятствуют вторичному засолению (реставрации засоления) орошаемых земель.

Мелиоративный период — временный этап процесса освоения засоленных земель. В этот период дренажный сток, формирующийся за счет как промывных, вегетационных и других поливов, так и атмосферных осадков, интенсивно удаляя соли из почв, грунтов и грунтовых вод орошаемого массива, создает постоянно улучшающиеся условия общего почвенного плодородия и, соответственно, имеет довольно высокую минерализацию. Степень минерализации дренажного стока непрерывно падает от начала к концу периода. В эксплуатационный период дренажный сток по степени своей минерализации становится вполне пригодным для повторного использования в ирригации.

Теперь уже, по-видимому, можно утверждать, что постоянная коллекторно-дренажная сеть на засоленных и подверженных засолению орошаемых землях строится для выполнения мелиоративных задач эксплуатационного периода. Попутно отметим, что для проведения капитальных промывок в мелиоративный период дополнительно к постоянной строится временная дренажная сеть.

Применительно к орошаемым землям под дренажом обычно понимают процесс удаления дренажного стока за пределы активного слоя почвы. В данном параграфе речь идет не об удалении, а о формировании дренажного стока.

На ограниченном участке орошаемой территории аридной зоны при глубоком залегании грунтовых вод дренажный сток формируется в основном за счет оросительной воды. В отдельные годы, когда на этот участок земли выпадают обильные атмосферные осадки, при соответствующей влажности почвы, дренажный сток может образоваться и за счет осадков.

Если орошаемый массив не засолен, дренажный сток формируется в результате естественной фильтрации, являющейся сопутствующим орошению процессом. В этом случае величина дренажного стока зависит от общего количества и интенсивности поступления поливной воды и атмосферных осадков на орошаемый массив, а также от коэффициента фильтрации расчетного слоя почвы. Эта зависимость может быть выражена формулой

$$D_v = vFt, \quad (16)$$

где v — скорость фильтрации воды через расчетный слой почвы при полном ее насыщении влагой (при влажности, превышающей НВ), м/сутки;

F — размер орошаемой площади, м²;

t — расчетный интервал времени, в течение которого происходит фильтрация, сутки.

Экспериментальным путем установлено, что скорость фильтрации есть функция градиента пьезометрического напора. Эта зависимость для многих дисперсных сред имеет вид

$$v = k_{\phi} j = -k_{\phi} \frac{dh}{ds}, \quad (17)$$

где $j = -\frac{dh}{ds}$ — градиент пьезометрического напора h (отрицательный знак показывает, что вектор скорости v направлен в сторону напора h); k_{ϕ} — коэффициент фильтрации.

Пьезометрический напор h в некоторой точке области движения воды складывается из геометрической высоты z этой точки над некоторой плоскостью сравнения и статического напора воды в данной точке и выражается зависимостью

$$h = \frac{p}{\rho g} + z,$$

где p — давление; ρ — плотность жидкости; g — ускорение силы тяжести.

Зависимость (17) была впервые установлена Генри Дарси и называется законом Дарси.

Используя закон Дарси, можно определить суммарную величину расхода воды на фильтрацию с орошаемой территории в течение вегетационного периода по уравнению (16). Этот вид расхода обычно считается потерей оросительной воды. Между тем, это не всегда верно, ибо фильтрационные воды с орошаемых территорий в тех случаях, когда они в составе возвратных вод попадают в источники орошения и повторно используются на нижележащих землях, нельзя относить к категории безвозвратных потерь. Однако при проведении поливов на незасоленных землях необходимо всячески бороться с таким видом расходования воды, так как фильтрационный поток в данном случае, не производя никакой полезной работы, неоправданно увеличивает поливные нормы, что вызывает дополнительные капитальные вложения в расширение подводящей гидрографической сети и гидротехнических сооружений.

При орошении засоленных и подверженных засолению земель дренажный сток формируется в вегетационный период в результате искусственно поддерживаемого промывного режима орошения из оросительных вод, а в невегетационный период — вследствие текущих промывок, а также влагозарядковых, предпосевных, увлажнительных и других невегетационных поливов за счет оросительных вод и частично атмосферных осадков.

В течение длительного времени считалось, что вегетационные поливы на орошаемых землях необходимо осуществлять в строгом соответствии с потребностями растений во влаге, не допуская излишнего расходования оросительной воды при поливах. При этом имелось в виду, что задача рассоления почв, грунтов и грунтовых вод решается капитальными и текущими промывками.

На капитальные промывки возлагалась задача опреснения значительной толщи почво-грунтов (4—5 м), на текущие промывки — поддержания солевого равновесия в активном слое почвы.

Известно, что с увеличением мощности слоя опреснения увеличивается норма промывных поливов. Так, американские ученые экспериментальным путем установили, что при норме промывных поливов в 3000 м³/га содержание солей в верхнем 30-сантиметровом слое сильно засоленной почвы уменьшается на 80%, при норме в 6000 м³/га — на 90% в том же слое и на 80% в слое 30—60 см, при норме в 9000 м³/га — соответственно на 100 и 90%, а в слое 60—90 см — на 80% и т. д. (Маслов и Нестеров, 1967). Подсчеты показывают, что для опреснения верхнего слоя почвы толщиной 1,5 м необходимо 21 000 м³/га воды, для слоя в 3 м — 37 000 м³/га, в 4,5 м — более 50 000 м³/га.

Аналогичные соотношения получены и советскими учеными: в зависимости от степени и характера засоленности почв, грунтов и грунтовых вод и мощности опресняемого слоя почво-грунтов норма капитальных промывных поливов меняется в пределах от 3—4 до 70—80 тыс. м³/га.

Научно-производственные эксперименты, проводимые в последние годы на засоленных землях Голодной степи, Мугано-Сальянского массива и Вахшской долины, показали, что, во-первых, капитальные промывки, независимо от мощности опресняемого слоя, не решают в окончательном виде задачу рассоления почв, грунтов и грунтовых вод; во-вторых, применение высоких и сверхвысоких промывных норм при капитальных промывках технически возможно, но экономически нецелесообразно; в-третьих, гидравлическая связь между почвенной влагой и грунтовыми водами способствует вертикальному передвижению солей, содержащихся в грунтовых водах и в глубоких слоях грунтов; в-четвертых, применение промывного режима орошения при использовании промытых земель под орошаемые культуры на фоне правильно рассчитанного и хорошо работающего дренажа позволяет не только осуществлять эффективную «солевую вентиляцию» активного слоя почв, но и продолжать процесс рассоления почв, грунтов и грунтовых вод.

На основании изложенных соображений можно сделать вывод, что при орошении засоленных и подверженных засолению земель капитальные промывки обеспечивают интенсивное рассоление корнеобитаемого слоя почвы (0,7—1,0 м в хлопкосеющих районах) до требуемой концентрации, а последующий промывной режим орошения на фоне дренажа — постепенное снижение солесодержания в более глубоких слоях почв, грунтов и грунтовых вод. Такой вывод пока признается не всеми мелиораторами, следовательно, нельзя его считать окончательным. Однако противники этой концепции теперь не отвергают ее столь категорически, как раньше.

Для определения норм промывных поливов предложено большое количество расчетных формул (Розов, 1936; Волобуев, 1948, 1959; Черкасов, 1950; Морозов, 1956; Коньков, 1948; Легостаев, 1953; Шошин, 1956). Все эти формулы получены эмпирическим путем на основе систематизации и обобщения опыта промывок в различных природных и хозяйственных условиях. Анализ показывает, что норма промывных поливов меняется в широких пределах в зависимости от мощности и водно-физических свойств опресняемого слоя почвы, характера и степени засоленности этого слоя, уровня и минерализации грунтовых вод, продолжительности периода и техники проведения промывок, состояния промываемого участка, условий дренированности, температуры и минерализации промывной воды и т. д.

В. Р. Волобуев, обобщая и анализируя большое количество натурных исследований различных авторов, обнаружил тесную связь нормы промывных поливов со степенью засоления почв и химическим составом солей. Отложив по оси ординат в обычной шкале величины промывных норм, а по оси абсцисс — логарифмы содержания солей в почве в тоннах на гектар (соответственно содержанию солей в верхнем метровом слое в процентах), он получил график, где зависимость промывной нормы от степени исходного засоления и химического состава солей выражается прямыми линиями с разным углом наклона. (Волобуев, 1959). Этот график описан уравнением

$$w = k_n \lg \left(\frac{S_1}{S_0} \right)^\lambda,$$

где w — промывная норма, $\text{м}^3/\text{га}$;

S_1 — содержание солей в промываемой почве в любых единицах их измерения;

S_0 — допустимое содержание солей в тех же единицах, что и S_1 ;

λ — угловой коэффициент соответствующей прямой на полулогарифмическом графике;

k_n — коэффициент пропорциональности (при расчете промывной нормы в $\text{м}^3/\text{га}$ он равен 10000).

Показатель степени λ является показателем солесодержания: при значительном хлоридном солевом составе он равен 0,90—0,95, при смешанном сульфатно-хлоридном — 1,0, при сульфатно-натриевом 1,1—1,2, при сульфатно-натриево-кальциевом засолении — примерно 1,5.

Из многочисленных эмпирических формул формула Волобуева наиболее проста и приемлема для практического расчета промывной нормы. Для условий Средней Азии, где орошаемые засоленные земли используются под хлопково-люцерновый севооборот, экспериментально установлено, что если промывается только активный слой почвы на фоне хорошо работающего дренажа, норма капитальных промывных поливов составляет 5—15 тыс. $\text{м}^3/\text{га}$. В США земли, находящиеся в аналогичных условиях, промываются приблизительно такими же нормами (Маслов, Нестеров, 1967).

В последние годы проводятся исследования по определению норм промывных поливов теоретическим (расчетным) путем. Рассматривая процесс передвижения легкорастворимых солей в почво-грунтах как перенос растворенных солей движущейся водой, осложненный «фильтрационной» диффузией, возникающей за счет разницы концентрации, исследователи описали этот процесс дифференциальными уравнениями (Айдаров, 1967). Полученные зависимости при расчетах промывных норм позволяют отойти от чисто эмпирических рекомендаций и использовать количественные соотношения передвижения легкорастворимых солей в почво-грунтах.

На значение процесса диффузии при определении промывных норм обратили внимание также американские ученые (Nielsen, Biggar, Luthin, 1966).

Вернемся к определению норм вегетационных поливов. Как уже говорилось, при орошении засоленных и подверженных засолению земель вегетационные поливы необходимо проводить повышенными нормами. Эту точку зрения теперь поддерживает большинство мелиораторов. Достаточно вспомнить, что повышенные нормы поливов для создания нисходящего тока («промывной» режим орошения) рекомендовались Всесоюзной научно-технической конференцией по борьбе с засолением, проходившей в 1964 г. в Ташкенте.

Нисходящие токи поливной воды необходимы для создания отрицательного солевого баланса орошаемого масси-

ва земель. Уравнение солевого баланса орошаемого массива за определенный отрезок времени в наиболее общем виде можно записать так:

$$\Delta S = \alpha_d D - \alpha_n П,$$

где ΔS — солевой баланс, т. е. разность между содержанием солей в дренажной и поливной воде m ;

D — дренажный сток, m^3 ;

$П$ — объем поливной воды, m^3 ;

α_d и α_n — минерализация соответственно дренажных и поливных вод, m/m^3 .

Знак ΔS означает направленность процесса: знак «+» — засоление, знак «—» — рассоление почв. При солевом равновесии $\Delta S = 0$.

Некоторые исследователи считают, что отношение $D:П$ должно быть равно отношению концентрации солей в поливной воде к максимально допустимой концентрации их в корневой зоне («Дренаж сельскохозяйственных земель», 1964; «Растение и вода», 1967). На основе этого соотношения определяют промывную норму вегетационных поливов, т. е. объем воды, который должен пройти через корнеобитаемый слой почвы, чтобы предотвратить ее засоление. Например, если возделываемая культура может выдержать без существенного снижения урожайности концентрацию солей, в 4 раза большую, чем в поливной воде, то четвертая часть поливной воды должна профильтроваться через корнеобитаемую зону и выйти в дренажный сток. Такое утверждение справедливо только для случая, когда $\Delta S = 0$, т. е. в расчетном слое почвы поддерживается солевое равновесие. Тогда уравнение солевого баланса имеет вид

$$\alpha_d D = \alpha_n П$$

или

$$\frac{D}{П} = \frac{\alpha_n}{\alpha_d};$$

отсюда

$$D = \frac{\alpha_n}{\alpha_d} П.$$

В приведенном выше примере $\alpha_n = 1$, $\alpha_d = 4$. Следовательно,

$$D = \frac{1}{4} П.$$

В общем случае, когда нисходящие токи поливной воды не только опресняют активный (корнеобитаемый) слой

почвы, но и способствуют последовательному снижению со-
лесодержания в более глубоких слоях грунтов и грунтовых
вод, их величина должна быть определена исходя из зави-
симости

$$D = \frac{\alpha_n \Pi}{\alpha_d} + \frac{\Delta S}{\alpha_d}.$$

Систематические наблюдения за дренажным стоком, ми-
нерализацией дренажных и поливных вод практически не
ведутся. Концентрация солей в дренажном стоке изменчива
во времени, динамика этих изменений изучена недостаточ-
но. К тому же в последнем уравнении — два неизвестных
(D и Π). Таким образом, по этому уравнению определить
величину D не представляется возможным. Между тем по-
ливные и оросительные нормы при орошении засоленных и
подверженных засолению земель зависят от величины D и
для установления оптимального режима орошения необхо-
димо разработать сравнительно простые и точные методы
определения промывных норм на вегетационных поливах.

Чтобы иметь представление о порядке величин D , при-
ведем некоторые данные из практики орошения.

В Вахшской долине Таджикской ССР при отсутствии
природной дренированности и значительного засоления поч-
во-грунтов искусственно созданный дренаж (35—40 *пог. м/га*)
отводил до 50% суммарной водоподачи. К настоящему вре-
мени засоление почв на этих землях практически полностью
ликвидировано, но и при этих условиях считается целесооб-
разным поддерживать искусственный отток дренажных вод
в объеме 20—25% водоподачи на орошение (Ковда, 1958;
Бончковский, 1963).

В Хорезмской области Узбекской ССР при удельной
протяженности коллекторно-дренажной сети 21,6 *пог. м/га*
дренажный сток составляет около 30% суммарной водопо-
дачи.

В условиях Голодной степи для обеспечения сероземно-
лугового режима рекомендуется отводить дренами пример-
но 30% суммарной водоподачи (Рачинский, Решеткина,
1965).

В отдельных оросительных системах долины Империл
(США) дренами отводится до 33,1% суммарной водоподачи
(Доннан и др., 1954). На ирригационной системе Шошони
дрены, расположенные в гравелистых слоях на глубине 2,4—
3,3 м, запроектированы на отвод 30—40% общего количества
воды, подаваемой на земли (Magrhy, 1914). В США для про-
филактики засоления в среднем по стране рекомендуется
увеличить поливные нормы не менее чем на 25% (Маслов,
Нестеров, 1967).

Исходя из изложенного, можно сделать следующие выводы:

1. Дренажный сток — один из необходимых в аридной зоне компонентов режима орошения, количественно он составляет от 20—25 до 35—40% суммарной водоподачи на ирригацию.

2. Освоение и орошение засоленных и подверженных засолению земель следует сопровождать одновременным строительством как оросительных, так и коллекторно-дренажных систем, причем последние должны работать так же четко, как и оросительные системы.

3. При проектировании и строительстве коллекторно-дренажных систем необходимо предусматривать не только отвод дренажных вод за пределы орошаемой территории, но также сбор и сброс этих вод в естественные (реки) или искусственные (ирригационные каналы) источники орошения.

4. При эксплуатации коллекторно-дренажных систем одновременно с содержанием их в исправном состоянии необходимо наладить количественный и качественный учет дренажных вод.

5. Назрела настоятельная необходимость в детальных научных исследованиях по изучению дренажного стока с целью разработки методики расчета.

Потери оросительной воды

При транспортировании оросительной воды, ее распределении и поливах определенная часть воды теряется. Эти потери можно разбить на две группы. К первой относятся потери непосредственно на орошаемом поле, ко второй — в искусственной гидрографической сети, предназначенной для подведения оросительной воды от источников орошения до орошаемого поля.

Целесообразно разделить потери оросительной воды еще на абсолютные и относительные. Абсолютные — это потери безвозвратные, относительные — потери воды, которая при определенных условиях может быть собрана и повторно использована.

Непосредственно на орошаемом поле наблюдаются потери воды на фильтрацию с орошаемого поля, на испарение с открытой водной поверхности в период проведения поливов, на поверхностный сброс оросительной воды с орошаемого поля. Из них потери на фильтрацию и сброс — относительные, потери на испарение — абсолютные.

Размеры потерь в данных почвенных и климатических условиях определяются способом и техникой полива. При по-

верхностном способе орошения они имеют наибольшие величины, при подпочвенном — наименьшие.

В настоящее время наиболее распространен во всех странах мира поверхностный способ орошения. В США этим способом поливается около 86, дождеванием — 13 и подпочвенным 1—2% орошаемых земель. В СССР поверхностный способ применяется свыше чем на 96, а дождевание примерно на 3% орошаемых земель.

Рассмотрим более подробно потери оросительной воды при поверхностном способе орошения.

Потери на фильтрацию. При искусственном орошении земель потери оросительной воды на фильтрацию поддаются регулированию и могут быть в идеальном случае доведены до нуля. Имея это в виду, некоторые специалисты исключают их из расходной статьи водного баланса орошаемого поля. Между тем, при существующей технике полива в случае орошения незасоленных земель, обеспеченных естественным оттоком фильтрационных вод, практически невозможно ликвидировать эти потери полностью; в другом случае, когда орошаются засоленные или подверженные засолению земли, нисходящие фильтрационные токи воды через почву (промывной режим орошения) создаются искусственно, и фильтрационные воды удаляются через специальную коллекторно-дренажную сеть за пределы орошаемого поля. Потери на фильтрацию с орошаемого поля неизбежны потому, что, подавая поливную воду по бороздам, необходимо обеспечить равномерное увлажнение расчетного слоя почвы по всей длине борозд до оптимального размера. По величине эти потери при прочих равных условиях бывают тем больше, чем больше длина борозд. Размеры потерь зависят также от фильтрационных свойств почв и от условий дренированности орошаемой территории.

Многочисленными опытами установлено, что потери на фильтрацию с орошаемого поля при бороздковом способе полива составляют 25—35% от общего количества воды, подаваемой на поле (Mc. Culloch, Schrunck, 1955; Israelsen, 1950). В каждом конкретном случае при наличии необходимой информации размеры этих потерь можно определить расчетным путем.

Потери на испарение с водной поверхности. При бороздковом способе орошения в период проведения поливов определенная часть орошаемого поля бывает покрыта водой, с поверхности которой под воздействием теплоэнергетических факторов происходит испарение.

Для определения величины испарения с открытой водной поверхности предложен ряд эмпирических формул. В СССР

наибольшее распространение получила формула Иванова (1941, 1948)

$$E = 0,0018 (25 + t)^2 (100 - a),$$

где E — испаряемость, мм;

t — средняя месячная температура воздуха;

a — средняя месячная относительная влажность воздуха, %.

По опытным данным С. Н. Рыжова (1968), при круглосуточных поливах в условиях Средней Азии потери на испарение с открытой водной поверхности в период проведения поливов не превышают 5—10% от общего количества воды, подаваемой на поле.

Потери на сброс с орошаемого поля. Этот вид потерь также поддается регулированию.

Известно, что при увлажнении почвы скорость впитывания ею воды убывает во времени. Используя эту особенность процесса инфильтрации, можно осуществить бороздковый полив так, чтобы обеспечить равномерное увлажнение расчетного слоя почвы по всей длине борозды. Для этого необходимы тщательная планировка поливной карты, хорошая обработка почвы, рациональный подбор длины борозд, совершенные устройства, позволяющие регулировать величину расхода воды в борозде, и т. д. Осуществление всех этих требований в полевых условиях связано с затратой дополнительных сил, средств и времени. Поэтому на практике почти повсеместно допускается сброс воды в конце борозд, величина которого, по опытным данным, не превышает 5—10% от общего количества воды, подаваемой на орошаемое поле. Таким образом, непосредственно на орошаемом поле при поверхностном способе орошения теряется от 35 до 55% поливной воды, из них 5—10% составляют абсолютные и 30—45% — относительные потери.

В практике орошаемого земледелия существует понятие «коэффициент использования воды» (к. и. в.), под которым понимают отношение суммарного расхода воды в течение вегетационного периода на испарение и транспирацию к общему количеству воды, подаваемой на орошаемое поле.

Если принять за основу расчета размеры потерь на орошаемом поле в пределах 35—55% от общего количества подаваемой на поле воды, то к. и. в. составит 0,45—0,65. Коэффициент использования воды характеризует эффективность орошения, следовательно, хозяйства заинтересованы в его повышении. Между тем на практике возможности для повышения к. и. в. путем уменьшения непроизводительных расходов воды при поливах ограничены, а увеличение его за счет сокращения нисходящих токов фильтрационных вод

противоречит мелиоративным требованиям. По-видимому, следует пересмотреть положение о к. и. в. В США утвердилось мнение, что повышать его при поливах не следует, и это мнение аргументируется следующими соображениями (Маслов, Нестеров, 1967):

для повышения эффективности использования оросительной воды необходимо улучшение качества поливов, а для этого нужны дополнительная рабочая сила и материальные затраты;

на фоне нормально действующего дренажа и при использовании коллекторно-дренажных вод для орошения вполне допустим излишний расход воды при поливах;

поливы повышенными нормами способствуют рассолению почв, грунтовых вод и грунтов и тем самым — прогрессивному повышению плодородия почв.

Остановимся еще на одном вопросе. Некоторые исследователи считают, что за поливную норму нетто необходимо принимать количество воды, которое в расчете на 1 га создается в активном слое почвы в интервале влажности НВ—ВРК за один полив и затем расходуется на суммарное испарение в межполивной период. При такой формулировке в поливной норме нетто не учтены расход воды на суммарное испарение с орошаемого поля в период проведения поливов и все виды перечисленных выше потерь с поля.

Под оросительной нормой нетто обычно понимают общее количество воды ($m^3/га$), подаваемое на поле в период вегетации. Оросительная норма представляет собой суммы поливных норм. Следовательно, поливной нормой нетто следует считать общее количество воды ($m^3/га$), подаваемое на поле за один полив. В такой формулировке поливной нормы нетто предусмотрены расход воды на суммарное испарение в период проведения поливов и все виды потерь с орошаемого поля. Казалось бы, поливная норма, где учтены все виды потерь с поля, должна быть названа нормой брутто, а норма нетто — это как бы «чистое» водопотребление, расход без потерь. Однако в практике орошаемого земледелия нормой брутто принято называть оросительные и поливные нормы, учитывающие потери в ирригационной сети, подводящей воду от источников орошения до орошаемого поля.

Таким образом, ввиду отсутствия четкости в толковании оросительных и поливных норм исчезают из поля зрения потери оросительной воды с орошаемого поля. Между тем эти потери происходят и, по-видимому, в ближайшей перспективе еще будут происходить. Попытки путем всяческих оговорок свести их к нулю необоснованны. Поливные и оросительные нормы, устанавливаемые без учета этих потерь,

обычно бывают заниженными. Вероятно, этим отчасти можно объяснить то обстоятельство, что фактическое расходование воды на орошаемых землях Средней Азии, как правило, на 30—50 и более процентов больше рекомендуемого научно-исследовательскими и проектными институтами (Алимов, 1967).

Принятие заниженных оросительных норм приводит к большим ошибкам при планировании и проектировании комплексного использования водных ресурсов орошаемых районов, а также чревато крупными просчетами при определении параметров ирригационных каналов и гидротехнических сооружений.

Исходя из изложенного, можно прийти к выводам, что: поливные и оросительные нормы нетто следует устанавливать с учетом всех потерь с орошаемого поля;

поскольку относительные потери составляют подавляющую часть (85—90%) общих потерь воды с орошаемого поля и по абсолютной величине они значительны, необходимо организовать их сбор и использование на нижележащих землях или сброс в ближайшие источники орошения для повторного использования;

сборная и сбросная сеть, предназначенная для отвода в источники орошения вод, формирующихся на орошаемых территориях как из относительных потерь с орошаемых полей и ирригационных каналов, так и из атмосферных осадков, в обязательном порядке должна быть включена в состав проекта орошения и выполнена в натуре.

В ирригационных каналах, транспортирующих оросительные воды от источников орошения до места потребления, наблюдаются потери оросительной воды на фильтрацию, на испарение с открытой водной поверхности и на поверхностный (холостой) сброс с каналов. Если берега каналов обсажены деревьями, то к этим потерям добавляются потери на транспирацию. Потерям на транспирацию способствует в отдельных случаях также дикая влаголюбивая растительность в каналах. При неправильной эксплуатации каналов оросительная вода теряется на переливы через борта каналов, на утечку через сооружения, на непредвиденные сбросы и т. д.

Потери оросительной воды на испарение и транспирацию относятся к абсолютным, потери на фильтрацию и сбросы — к относительным. Понятно, что потери имеют наибольшие величины на открытых и наименьшие — на закрытых оросительных системах.

В условиях орошаемых районов в настоящее время массовое распространение имеют открытые системы, поэтому рассмотрим более подробно потери оросительной воды в них.

Начнем с потерь на фильтрацию. В ирригационных каналах открытого типа, проложенных в естественных грунтах, размеры потерь воды на фильтрацию колеблются в широких пределах в зависимости от фильтрационных свойств грунтов и условий дренированности территории, длины и параметров каналов, величин расчетного расхода воды и периодичности действия, состояния ложа и берегов и т. д. По данным Бюро мелиорации, в некоторых орошаемых районах США фильтрация воды из необлицованных каналов составляет 50 и более процентов от головного водозабора («Дренаж сельскохозяйственных земель», 1964). В 1955 г., по сведениям геологической службы США, на орошение 13,7 млн. га земель было взято из всех источников 152 км^3 воды ($11,1 \text{ тыс. м}^3/\text{га}$); из этого количества 40 км^3 , или 26,3%, составили потери на фильтрацию (Маслов, Нестеров, 1967). Приблизительно такими же цифрами характеризуются потери на фильтрацию в оросительных системах СССР (Миркин, 1954, 1960; Легостаев, 1959 и др.).

Разработаны достаточно объективные методы определения величин потерь воды на фильтрацию из каналов, предложен ряд эмпирических формул. Они общеизвестны и подробно описаны в литературе. Мы акцентируем внимание на этом вопросе потому, что из всех потерь оросительной воды в каналах наибольшую величину составляют потери на фильтрацию (70—80%). Следовательно, борьба с этими потерями — одна из центральных задач правильной постановки орошения.

Наиболее радикальным средством борьбы с потерями оросительной воды на фильтрацию служат противофильтрационные покрытия на каналах (бетон, асфальт, камень, полиэтиленовые, хлорвиниловые и другие планки и т. д.). Потери на фильтрацию можно сократить в значительных размерах также путем применения лотков, калыматацией, цефтеванием русел, уплотнением ложа каналов, улучшением условий эксплуатации и т. д.

Однако, тут хотелось бы подчеркнуть одно немаловажное обстоятельство. Дело в том, что потери оросительной воды на фильтрацию из каналов относятся к категории относительных потерь. Следовательно, при определенных условиях воды, теряемые из каналов на фильтрацию, могут быть повторно использованы водопотребителями. Речь идет об условиях дренированности территории (естественной или искусственной). К сожалению, при проектировании оросительных систем на это обстоятельство не обращается достаточного внимания. В результате «нередко в нашей практике гидроизоляция делается там, где она менее эффективна, и

не делается на тех сооружениях, где она была бы особенно необходимой и полезной» (Ковда, 1967).

Если существующая сеть рек, потоков, оврагов и т. д. является дренирующей, отводящей в источники орошения грунтовые воды местности, или такой отвод возможно эффективно осуществить искусственным путем, то необходимость в противофильтрационных покрытиях на каналах отпадает. Больше того, фильтрационные воды из каналов в этом случае оказывают рассоляющее действие на почвы, грунты и грунтовые воды местности (Аверьянов, 1959). Характерен в этом отношении опыт США. Там идут главным образом не по пути сокращения потерь воды из оросительной сети за счет облицовки каналов, а по пути строительства дренажа с использованием откачиваемых вод на орошение (Легостаев, 1957).

Так, в США к 1963 г. из 256 тыс. км оросительных каналов противофильтрационными одеждами было покрыто всего 13,8 тыс. км, т. е. 5,2%. В то же время треть всей орошаемой площади поливается за счет грунтовых вод. Для этой цели широко развернуто строительство вертикального дренажа (Легостаев, 1957).

При горизонтальном дренаже дренажные воды отводятся в источники орошения. Если собираемая дренами вода не может быть отведена самотеком, устраиваются насосные станции, с помощью которых вода из дрен сбрасывается в источники орошения (в реки или в ближайшие каналы).

Делегация советских специалистов, побывавшая в США в 1963 г., ознакомившись с вопросами ирригационного строительства и эксплуатации оросительных систем, пришла к заключению, что «следует признать рациональным широкое применение повторного использования на орошение сбросной воды с полей и из оросительной сети, даже если при этом потребуются применение машинного водоподъема (Озерский, 1965). Возникает вопрос: что лучше — бороться с фильтрацией из каналов путем применения антифильтрационных покрытий или, отказавшись от них (что не исключает необходимость применения других легкодоступных средств, направленных на сокращение фильтрационных потерь из каналов), принять все меры для сбора и повторного использования фильтрационных и сбросных с каналов вод? В общей постановке ответить на этот вопрос однозначно не представляется возможным, да и не нужно. В каждом конкретном случае ответ следует искать исходя из технико-экономического анализа вариантов с учетом местных условий, главным образом условий дренированности территории в широком плане. Важно то, что при проектировании орошения на этот вопрос необходимо дать ответ. Следовательно, ана-

лиз вариантов должен быть в обязательном порядке представлен в составе проекта орошения.

Рассмотрим теперь потери на испарение с открытой водной поверхности каналов. По величине эти потери незначительны — в худшем случае 5—10% от общих потерь в каналах. Размеры их обусловлены главным образом климатическими факторами района действия канала и площадью испаряющей водной поверхности и могут быть определены расчетным путем.

Например, по Костякову (1960), потери на испарение на 1 км длины канала составляют

$$E = 0,0116he (\alpha + 24\varphi) \text{ м}^3/\text{сек},$$

или $\varepsilon = \frac{1,16e (\alpha + 2\varphi)}{(\alpha + \varphi) h} \%$ от расхода канала,

где e — слой испарения, $\text{м}/\text{сутки}$, определяемый по формуле Иванова (1941, 1948);

$\alpha = \frac{b}{h}$ — отношение ширины к глубине воды в канале;

φ — заложение откосов;

h — глубина воды в канале, м .

Что касается потерь на поверхностный (холостой) сброс с каналов, то они также невелики — от 5 до 10, а иногда до 25% от общих потерь в каналах — и определяются технической оснащенностью и уровнем эксплуатации оросительных систем. В условиях социалистического хозяйства при плановом водопользовании эти потери могут быть доведены до нуля.

Таким образом, можно констатировать, что:

в оросительных каналах открытого типа на современном уровне их эксплуатации и технической оснащенности теряется около 50% подаваемой в них из источников орошения воды. По данным Миркина (1960), в оросительных системах СССР из забираемого ими годового объема воды в 65 млрд. м^3 теряется около 30—35 млрд. м^3 ;

из всех потерь оросительной воды в каналах 90—95% относятся к относительным и 5—10% — к абсолютным потерям. На оросительных системах СССР значительная часть относительных потерь является безвозвратной из-за того, что не организован их сбор и повторное использование. Для повышения степени использования водных ресурсов необходимо принять безотлагательные меры к сбору и повторному использованию фильтрационных и сбросных с каналов вод, а там, где это экономически нецелесообразно или технически невозможно, — к сокращению потерь воды из каналов путем применения антифильтрационных средств и улучшения условий эксплуатации оросительных систем;

при проектировании орошения новых земель необходим тщательный технико-экономический анализ всех вариантов повышения степени использования водных ресурсов в пределах водохозяйственной системы, в том числе возможности повторного использования в ирригации сбросных и возвратных вод;

поливные и оросительные нормы брутто необходимо устанавливать с учетом всех потерь, происходящих при транспортировании оросительной воды от источников до места потребления.

Атмосферные осадки

Атмосферные осадки—один из основных природных факторов, характеризующих климат местности.

Агроклиматологи, классифицируя климат с точки зрения земледелия, исходят в основном из двух факторов — осадков и температуры. В отдельных случаях вместо температуры принимают испаряемость, которая находится в коррелятивной связи с температурой. В зависимости от соотношения этих факторов территории делятся на климатические зоны. Одни авторы пользуются отношением осадков к температуре, называя его гидротермическим коэффициентом (Селянинов, 1955; Миркин, 1960; «Гидрогеология и геология аридной зоны земного шара», 1955), или осадков к испаряемости, называя это отношение коэффициентом увлажнения (Костяков, 1960; Иванов, 1958 и др.); другие используют отношение испаряемости к осадкам, или «индекс сухости» (Дмитревский, 1967). Наблюдается определенное разноречие и в терминологии, определяющей климатические зоны (аридные, полуаридные, гумидные, полугумидные, пустынные, полупустынные, засушливые, полузасушливые и т. д.). Некоторая условность допускается при установлении границ климатических зон. По-видимому, эти вопросы требуют дальнейших, более детальных исследований. Мы останавливаемся на них лишь постольку, поскольку от природной увлажненности территории зависит потребность в искусственном орошении.

В 1951 г. по поручению ЮНЕСКО П. Мейджс (1955) составил карту распределения на земном шаре аридных и полуаридных гомоклиматов. Для выделения климатических зон он принял систему, разработанную Торнтвайтом в 1948 г.; в основу ее положен индекс, учитывающий достаточность атмосферных осадков для удовлетворения потребностей растений в воде. Там, где количество атмосферных осадков, определяемое ежемесячно, создает запасы воды в почве, достаточные для обеспечения максимальной транспирации и испарения в течение года, индекс влажности равен нулю. Торнт-

вайт называют климаты, имеющие индексы влажности от 0 до 20, субгумидными, от 20 до 40 — полуаридными, от 40 и выше — аридными.

Для некоторых районов, в частности тропиков и субтропиков, где температура из года в год меняется относительно мало, степень природной увлажненности определяется непосредственно в зависимости от колебания количества осадков. Так, Гельман (Stern, 1928) предложил коэффициент колебания осадков k_k — отношение максимального количества осадков к минимальному — и дал шкалу зависимости сельскохозяйственного производства от этого коэффициента.

Согласно Гельману, при $k_k = 0, \div 2,0$ условия для сельского хозяйства очень благоприятны, при $k_k = 2,0 \div 2,4$ — благоприятны, при $k_k = 2,5 \div 2,9$ — довольно благоприятны, при $k_k = 3,0 \div 3,9$ — малоблагоприятны, при $k_k = 4,0 \div 4,9$ — неблагоприятны и при $k_k = 5,0$ и выше — очень неблагоприятны.

Ж. Друэн (1955) идет на дальнейшее упрощение. Для условий Африки он предлагает принять следующие определения границ климатических зон: гумидная зона — районы, где количество годовых осадков более 500 мм; полуаридная зона — от 500 до 100 мм и аридная зона — менее 100 мм осадков в год.

Агроклиматическое районирование Средней Азии проводилось рядом специалистов (Молчанов, 1925, 1934; Бабушкин, 1960, 1961 и др.). Наиболее детально его осуществил Бабушкин (1961), который установил климатические зоны и границы между ними исходя из внутригодового распределения осадков — отношения летних осадков (за июль—август) к зимним (за декабрь—февраль) и к годовым. При дальнейшей детализации он использовал и другие факторы: температуру, относительную влажность воздуха в дневные часы, степень суховейности и т. д.

Все авторы относят равнинную территорию Средней Азии к зоне, где нормальное ведение сельскохозяйственного производства невозможно без искусственного орошения. А в условиях орошения, когда увлажнение почвы регулируется человеком в соответствии с требованиями растений и метеостановкой, такой климатический элемент, как атмосферные осадки, часто отодвигается на второй план. Больше того, считается, что атмосферные осадки, выпадающие на равнинную территорию Средней Азии и Южного Казахстана, не играют существенной роли ни в покрытии потребности в воде возделываемых на орошаемых землях культур, ни в формировании водных ресурсов территории. Это мнение мотивируется тем, что выпадающие здесь атмосферные осадки по

величине незначительны и по внутригодовому распределению неблагоприятны для ирригации и что они целиком расходуются на испарение.

Между тем при тщательном анализе оказывается, что атмосферные осадки в районах орошаемого земледелия занимают большое место в удовлетворении потребностей растений в воде и требуют определенной оценки с точки зрения их ирригационной эффективности. Вопрос этот очень сложный, и мы коснемся его лишь в самом общем плане, не рассматривая такие вопросы как методика измерения количества осадков и измерительные приборы, оптимальное размещение осадкомерных пунктов по территории в зависимости от заданной точности измерения, причины вариаций количества осадков по площади и во времени, задержание осадков растительным покровом.

Остановимся лишь на дальнейшем поведении воды, выпавшей с осадками на поверхность орошаемой почвы.

Осадки, достигающие поверхности почвы, расходуются на поверхностный сток, на инфильтрацию в почву и на испарение.

Поверхностный сток образуется, когда интенсивность поступления воды на поверхность почвы (в виде дождей или талых вод) превышает водопроницаемость почвы. В противном случае вся влага впитывается в почву.

И поверхностный сток, и инфильтрация совершаются под действием силы тяжести. На скорость поверхностного стекания воды существенно влияют, помимо общего количества и интенсивности осадков, величина уклона и состояние поверхности почвы (степень ее шероховатости, наличие и состояние растительного покрова и др.), а на скорость инфильтрации, помимо водно-физических свойств почвы, — влажность ее перед поступлением атмосферных осадков.

Известно, что орошаемые земли, где поливы осуществляются поверхностным способом (по бороздам), имеют незначительные уклоны и хорошо обрабатываемую поверхность. Следовательно, без существенной ошибки можно допустить, что на них атмосферные осадки, как правило, не образуют поверхностного стока, и вся вода, поступающая на поверхность почвы, впитывается в почву.

Дальнейшее поведение атмосферной влаги в почве зависит прежде всего от количества и интенсивности осадков, затем от водно-физических свойств почв и условий дренированности территорий.

Из обобщенных данных об осадках за многолетний период по некоторым метеостанциям орошаемой зоны Средней Азии и Южного Казахстана (табл. 7) видно, что основная масса атмосферных осадков в равнинной части Средней

Азии выпадает в осенне-зимне-весеннее время (88—99% нормы или в абсолютном выражении — от 77 до 575 мм слоя). Осадки за три летних месяца (VI—VIII) составляют от 1—2 до 10—12% нормы или от 1 до 50 мм слоя в абсолютном выражении.

Таблица 7

Метеостанция	Норма осадков, мм	Распределение осадков по сезонам, % от годовой суммы			
		XII—II	III—V	VI—VIII	IX—XI
Ашхабад	262	31	48	8	13
Байрамали	139	40	46	2	12
Чарджоу	111	38	50	2	10
Керки	164	48	40	1	11
Ургенч	82	39	43	6	12
Каган	125	45	43	2	10
Гузар	285	37	45	3	15
Самарканд	328	34	48	3	15
Санзар	424	40	41	3	16
Мирзачуль	295	33	41	7	19
Джизак	425	38	41	4	17
Ташкент	367	36	40	5	19
Наманган	197	33	38	9	20
Фергана	186	33	38	10	19
Андижан	277	30	41	11	18
Ленинабад	195	28	41	12	19
Душанбе	611	36	48	6	10
Ош	397	30	42	11	17
Джалалабад	500	31	43	10	16
Чимкент	423	35	40	5	20
Джамбул	302	23	40	12	25

Водно-физические свойства почв Средней Азии (метрового слоя) характеризуются следующими данными (по Легостаеву):

Тип почв	Объемный вес	НВ, %	НВ, м ³ /га
Легкие	1,4	16	2200
Средние	1,42	20	2800
Тяжелые	1,45	24	3500

В вегетационный период в районах искусственного орошения влажность почв поддерживается в пределах НВ—ВРК. При осадках поливы не производятся. Следовательно, в период выпадения атмосферных осадков (т. е. в межполивной период) влажность почвы колеблется между НВ и ВРК. Осадки, попадая в почву, дополняют недостаток насыщения ее расчетного слоя до НВ, размер которого для метрового слоя показан в табл. 8.

Чем больше осадков выпадает за один прием, тем большее количество влаги впитывается в почву. Часть осадков расходуется на пополнение запасов влаги в почве до НВ, после чего начинается фильтрация, и вся фильтрующаяся за счет осадков вода, в зависимости от условий дренированности территории, идет или в дренажный сток или пополняет запасы грунтовых вод.

Таблица 8

Тип почв	НВ, $m^3/га$	Недостаток насыщения почвы ($m^3/га$) при различном исходном проценте ее влажности от НВ				
		50	60	70	80	90
Легкие	2200	1100	880	660	440	220
Средние	2800	1400	1200	840	560	280
Тяжелые	3500	1750	1400	1050	700	350

Это соотношение можно выразить зависимостью

$$x = \Delta W + \Phi,$$

где x — общее количество осадков, выпадающих за один прием, $m^3/га$;

ΔW — часть осадков, пополняющих запасы влаги в почве до НВ;

Φ — часть осадков, идущая на фильтрацию через расчетный слой почвы (условно назовем ее фильтрационным стоком атмосферных осадков);

$$\Delta W = W_k - W_n = HA(\gamma_k - \gamma_n),$$

где W_k — общее количество воды в почве при влажности, установившейся после очередных осадков, $m^3/га$;

W_n — общее количество воды в почве при влажности, установившейся до очередных осадков, $m^3/га$;

H — расчетная глубина промачивания почвы, m ;

A — скважность почвы, %;

$\gamma_k - \gamma_n$ — влажность почвы, после и до осадков соответственно, % от A .

При $\Delta W \geq x$ $\Phi = 0$. Если данное условие соблюдается при всех осадках, выпадающих на орошаемую территорию за вегетационный период, то общее количество воды, попавшее в почву в результате этих осадков, идет на пополнение «мобильных» запасов влаги в почве, расходуемой в последующем на испарение и транспирацию, и оросительная норма сокращается на величину, эквивалентную суммарным осадкам за вегетационный период.

При $\Delta W < X$ и $\Phi \neq 0$ часть атмосферных осадков попадает в дренажный сток и величина Φ тем больше, чем большее количество осадков выпадает за один прием и чем меньшее их количество расходуется на пополнение «мобильных» запасов влаги в почве. В этом случае оросительную норму необходимо сократить на величину суммы осадков за вегетационный период за вычетом величины $\Sigma \Phi$. Утверждения, что норму орошения дает баланс увлажнения местности, т. е. разность между суммой осадков и величиной испаряемости (Дмитревский, 1967), несостоятельны. Неверно также понимать под коэффициентом увлажнения местности «отношение суммы осадков к величине испаряемости за год, период вегетации, месяц или любой другой отрезок времени» (Иванов, 1958). Дело в том, что в период прохождения дождей испарение становится равным нулю. Если понимать под любым отрезком времени время прохождения дождей, то коэффициент, вычисленный для этого времени, теряет смысл. Искаженный результат получается и при принятии за расчетный интервал времени зимнего периода.

В равнинной части Средней Азии, как уже отмечалось, в осенне-зимне-весеннее время атмосферные осадки выпадают в значительных размерах, растет также мощность осадков (т. е. количество осадков, выпадающее за один прием). Между тем принято считать, что осадки этого периода расходуются на испарение, за исключением той части, которая идет на создание запасов влаги в активном слое почвы к началу вегетационного периода. А ирригационную эффективность этих осадков определяют исходя из создаваемых ими запасов влаги в активном слое почвы к началу вегетационного периода. Такой подход к оценке ирригационной эффективности атмосферных осадков следует считать ограниченным и неверным.

Рассмотрим поведение атмосферной влаги в почве в не-вегетационный период.

В зависимости от мощности осадков, вода, выпавшая с осадками на орошаемую почву, расходуется на пополнение запасов влаги в почве до НВ (ΔW) и на фильтрацию через активный слой почвы (Φ). Создаваемые в почве запасы влаги в период между осадками расходуются на физическое испарение, т. е. непродуктивно. Исключения составляют запасы, накопившиеся к началу вегетационного периода. Приняв во внимание это исключение, суммарную за невегетационный период величину расхода осадков на физическое испарение следует отнести к категории безвозвратных потерь. Попутно отметим, что за последнее время ставится вопрос о круглогодичном использовании орошаемых земель. Повторные (после хлопчатника) посевы сельскохозяйственных культур,

приспособленных к термическим условиям «вегетационных зим» (Бабушкин, 1961), безусловно, повысят эффективность осадков невегетационного периода как источника влаги для растений. Однако этот вопрос находится пока в стадии изучения.

Фильтрационный сток атмосферных осадков (Φ) также относится к потерям атмосферной влаги, так как он отводится дренами за пределы данной территории или уходит в грунтовые воды. Но это — относительные потери, потери для данной территории. К абсолютным они могут быть отнесены только тогда, когда фильтрационный сток разгружается в естественные понижения местности и расходуется на непродуктивное испарение.

Коллекторно-дренажная сеть в орошаемых районах, помимо выполнения своей основной — мелиоративной — функции, способствует формированию фильтрационного стока атмосферных осадков. Разумная организация сбора и сброса в источники орошения фильтрационных вод атмосферных осадков, включая и откачку грунтовых вод в тех случаях, когда в их запасы поступают фильтрующие воды, будет способствовать повышению в региональном масштабе эффективности осадков как дополнительного источника влаги для растений, что в свою очередь приведет к увеличению водных ресурсов орошаемых районов.

Органы гидрометслужбы длительное время ведут наблюдения за осадками. Накоплен ценный информационный материал, который частично статистически обработан с целью определения норм и изменчивости осадков. Эти проработки пока не позволяют оценить ирригационную эффективность атмосферных осадков по территории Средней Азии, тем более, по ним невозможно планировать их использование. Для этого потребуются специальные исследования.

Чтобы иметь хотя бы общее представление о значимости атмосферных осадков в условиях орошаемых районов Средней Азии, проведем ориентировочные расчеты, пользуясь имеющейся информацией.

Водный баланс атмосферных осадков за расчетный интервал времени t можно выразить равенством

$$\sum_{n=1}^N X_n - \sum_{n=1}^N \Delta W_n + \sum_{n=1}^N \Phi_n, \quad (18)$$

где n — число осадков за время t .

Приняв за расчетный интервал времени невегетационный период (X—III) и за ΔW — запас влаги в расчетном слое почвы, создаваемый атмосферными осадками к началу ве-

гетационного периода, уравнение баланса влаги в почве запишем следующим образом:

$$\Delta W = W_k - W_n = \sum_{t=1}^T (X_t - E_t - \Phi_t), \quad (19)$$

где W_k — общее количество воды в расчетном слое почвы к началу вегетационного периода, $м^3/га$;
 W_n — общее количество воды в расчетном слое почвы к концу вегетационного периода, $м^3/га$;
 T — средняя продолжительность невегетационного периода, сутки;
 X_T — сумма атмосферных осадков за период T , $м^3/га$;
 Φ_T — суммарная величина фильтрационного стока атмосферных осадков за период T , $м^3/га$.

Значение W_n определяем исходя из следующих соображений. Известно, что после последнего вегетационного полива влажность почвы становится равной НВ. Общее количество воды в расчетном слое почвы при влажности, равной НВ (W_0), известно из водно-физических свойств данной почвы (см. табл. 8). Запасы влаги, аккумулярованные в расчетном слое почвы, до конца вегетационного периода расходуются путем испарения и транспирации, а в начале невегетационного периода — в основном путем испарения с почвы. Выше уже говорилось, что при одних и тех же метеорологических условиях скорость испарения с почвы меняется с изменением влажности последней: испарение резко падает с момента уменьшения влажности почвы до предела, тормозящего подачу воды к испаряющей поверхности. Таким пределом принято считать ВРК.

При влажности почвы, близкой к ВРК, скорость испарения определяется скоростью диффузии пара через вышележащий сухой слой почвы, величина испарения ничтожно мала, даже при высокой температуре и большом дефиците влажности воздуха испарение не превышает десятых долей миллиметра в сутки (Вериге, 1948).

Экспериментально установлено, что глубина просыхающего в результате испарения слоя почвы не превышает в засушливых районах 20—30 см, а в сильно засушливых — 30—40 см. В нижележащих же слоях почвы запасы влаги при этом почти не изменяются (Вериге и Разумова, 1963; Разумова, 1950, 1959; Федосеев, 1941 и др.). Значит, можно утверждать, что значению W_n соответствует содержание влаги в расчетном слое почвы при влажности, равной ВРК.

Для расчета по формуле (19) использованы данные метеостанций «Ташкент», «Самарканд», «Андижан» по годам с

осадками, меньшими нормы, близкими к ней и большими нормы. Для Ташкента и Самарканда это годы 1939—1940, 1952—1953 и 1968—1969; для Андижана — 1962—1963, 1952—1953 и 1968—1969.

Величины испаряемости рассчитаны по формуле Иванова с поправкой Молчанова:

$$E_0 = 0,00144 (25 + t)^2 (100 - a).$$

Среднемесячные значения температуры (t , °C), относительной влажности воздуха (a , %), слоя осадков (X , мм) и испаряемости (E_0 , мм) приведены в табл. 9.

Из уравнения (19) получим

$$W_k = W_n + \sum_{t=1}^T (X_t - E_t - \Phi_t). \quad (20)$$

Зная количество воды в активном слое почвы к началу расчетного периода (W_n) и имея необходимые сведения об осадках и испаряемости, мы можем при помощи формул (18), (19) и (20) вычислить значения ΔW , E , Φ .

Укажем примерную последовательность таких вычислений. Предположим, что к моменту выпадения первых осадков невегетационного периода количество влаги в расчетном слое почвы (W_n) соответствует 0,7 НВ. Первые осадки пополняют запасы влаги в почве до W_1 , следовательно, количество воды, выпавшее с осадками (X_1), необходимо прибавить к W_n , т. е. $W_1 = W_n + X_1$. Если при этом $W_n + X_1 > \text{НВ}$ или $X_1 > 0,3 \text{ НВ}$, то $W_1 = W_0$ и образуется фильтрационный сток (Φ), величина которого будет $\Phi_1 = X_1 - 0,3 \text{ НВ}$. Если же $X_1 \leq 0,3 \text{ НВ}$, то $\Phi = 0$, $W_1 \leq W_0$. После прохождения осадков запасы почвенной влаги (W_1) начинают расходоваться на испарение. Если $W_1 = W_0$ и остается неизменным до очередных осадков, то испарение E за этот отрезок времени равно испаряемости E_0 . Если же $W_1 < W_0$, то испарение определяется по формуле

$$E = E_0 \frac{W_1}{W_0},$$

которая дает месячные величины испарения. Разделив E на количество дней в месяце, получим суточные величины испарения e_1 ; умножив e_1 на продолжительность (в сутках) первого расчетного периода (t_1), получим величину фактического испарения E_1 за этот период. Разность между количеством влаги в расчетном слое почвы после осадков (W_1) и расходом влаги на испарение в промежутке между

двумя осадками (E_1) и есть содержание влаги в почве перед очередными осадками (W'_n), т. е.

$$W'_n = W_1 - E_1.$$

Очередные осадки пополняют эти запасы влаги в почве до W_2 .

Таблица 9

Метеостанция и год наблюдения	Показатель	Среднемесячные значения						
		X	XI	XII	I	II	III	IV
Ташкент: 1939—1940	t	11,9	7,8	6,6	1,7	4,4	6,8	16,8
	a	62	67	68	72	74	68	53
	X	27,6	50,8	53,5	48,1	52,6	52,1	18,5
	E_0	74	51	46	29	32	47	118
1952—1953	t	12,4	1,3	-0,9	2,6	7,4	6,8	13,6
	a	49	76	78	72	59	71	60
	X	0	47,3	31,5	55,4	72	143,9	63,7
	E_0	103	24	18	31	63	42	86
1968—1969	t	13,1	8,1	1,0	-7,2	-7,3	6,8	14,6
	a	50	70	83	79	80	80	66
	X	27,6	56,9	99	147,6	33,9	183,9	100,3
	E_0	104	47	16	9,6	9,0	29	77
Самарканд: 1939—1940	t	11,5	7,7	6,2	2,2	4,5	5,5	15,8
	a	62	67	73	75	77	72	55
	X	16,9	32,6	22,8	52,1	61,6	58,1	5,6
	E_0	73	51	38	27	29	38	108
1952—1953	t	12,0	2,3	0,9	2,7	6,8	6,2	12,8
	a	46	70	75	70	65	72	65
	X	0,1	20,8	33,9	36,9	58,9	132,1	48,6
	E_0	106	32	24	33	51	39	72
1968—1969	t	12,2	7,8	3,1	-5,9	-5,9	7,1	13
	a	56	71	84	77	77	80	72
	X	13,7	24,2	58,5	108,3	34,5	142,1	95,6
	E_0	88	45	18	12	12	30	58
Андижан: 1962—1963	t	11,6	2,4	-2,4	-1,6	5,9	9,0	17,6
	a	72	76	82	80	79	72	64
	X	4,9	56,7	26,6	7,9	27,6	51,4	32
	E_0	54	26	13	16	29	47	94
1952—1953	t	13,4	3,1	-0,3	0,2	4,6	7,1	14,2
	a	56	75	77	80	73	72	63
	X	4,8	33,5	7,7	19,0	56,4	60,4	38,2
	E_0	93	28	20	18	34	42	82
1968—1969	t	13,0	6,3	1,5	-7,8	-8,6	5,8	15,2
	a	69	80	88	83	82	83	68
	X	10,2	12,7	65,2	119,9	55,6	117,4	32,7
	E_0	64	28	12	7,2	7,0	23	74

Таблица 10

Метео- станция	Расчетные годы	Количество осадков за период						Испарение за невегета- ционный пе- риод E_H	Фильтрацион- ный сток за невегета- ционный пери- од Φ_H		Запасы влаги в почве к на- чалу вегета- ционного пе- риода ΔW		Эффективная часть осадков невегетацион- ного периода $\Phi_H + \Delta W$		Ирригацион- ная эффек- тивность го- довых осад- ков $X_B +$ $+\Phi_H + \Delta W$	
		год X_T	невегетацион- ный X_H		вегетационный X_B		% от X_H		% от X_B	% от X_H	% от X_B	% от X_H	% от X_B			
			$M^2/2a$	% от X_T	$M^2/2a$	% от X_T								$M^2/2a$		% от X_T
Ташкент	{ 1939—1940 1952—1953 1968—1969	3567	2847	80	720	20	1276	44,8	1011	35,5	560	19,7	1571	55,2	2291	64
		4577	3501	78	1076	22	852	24,4	1869	53,4	780	22,2	2649	75,6	3725	81
		7830	5519	70,5	2311	29,5	616	11,5	4073	73,5	830	15,0	4900	88,5	7214	92
Самар- канд	{ 1939—1940 1952—1953 1968—1969	2858	2441	85	417	15	1065	43,6	916	37,6	460	18,8	1376	56,4	1793	63
		4070	2827	69,5	1243	30,5	895	31,7	1402	49,5	530	18,8	1932	68,3	3175	78
		5534	3813	69	1721	31,0	719	18,8	2474	65,0	620	16,2	3094	81,2	4815	87
Андижан	{ 1962—1963 1952—1953 1968—1969	2498	1751	70	747	30,0	869	49,5	342	19,5	540	31,0	882	50,5	1629	65
		2602	1818	69,6	784	30,4	773	42,6	430	23,6	615	33,8	1045	57,4	1829	70
		5376	3808	70,8	1568	29,2	401	10,0	2607	68,9	800	21,1	3407	90,0	4975	93

Дальнейший ход расчета аналогичен описанному выше (пример расчета по данным метеостанций «Ташкент», «Самарканд» и «Андижан» приводится в приложении I), и результаты его для удобства анализа сведены в табл. 10. Цифры, приведенные в таблице, приблизительны, уточнение их потребует более обширного исследования, но основные выводы можно сформулировать уже сейчас. Эти выводы следующие:

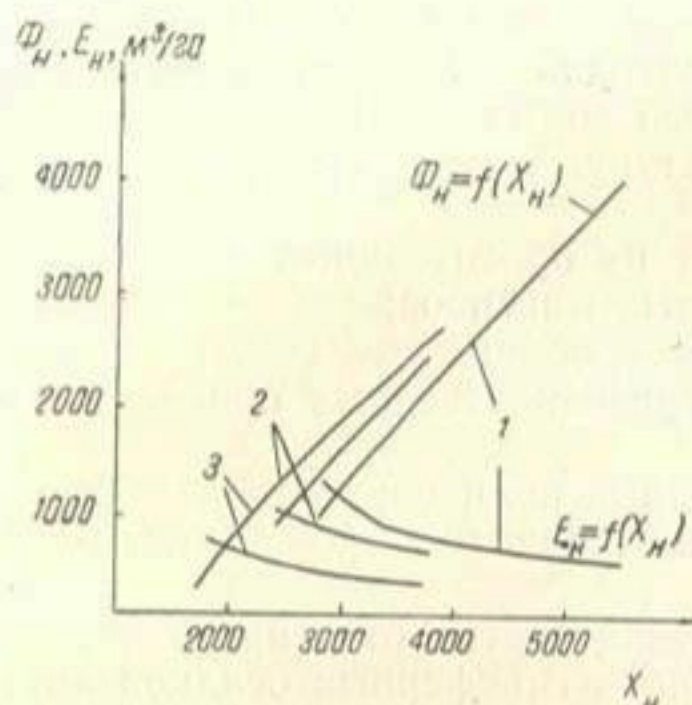


Рис. 3. Зависимости фильтрационного стока (Φ_n) и испарения (E_n) от величины осадков (X_n) по метеостанциям:

1—«Ташкент»; 2—«Самарканд»; 3—«Андижан».

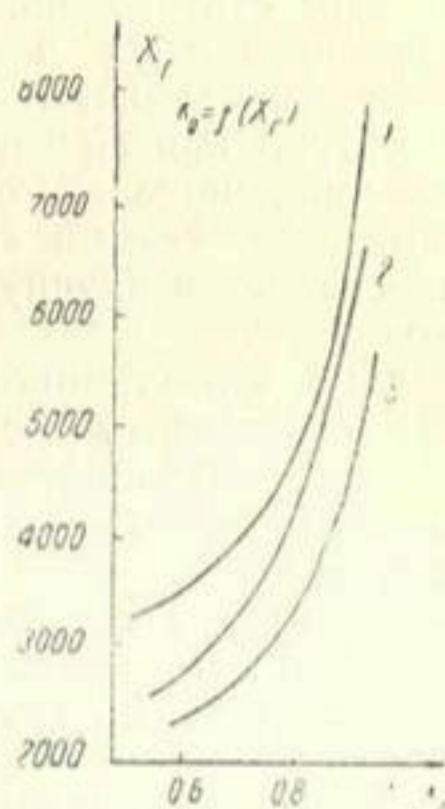


Рис. 4. Кривые, характеризующие эффективность атмосферных осадков по метеостанциям:

1—«Ташкент»; 2—«Самарканд»; 3—«Андижан».

1) осадки невегетационного периода составляют 69—85% годовой их суммы;

2) с увеличением количества осадков за невегетационный период возрастает доля их, идущая на фильтрацию (от 35,5% до 73,5% по метеостанции «Ташкент», от 37,6% до 65% — по метеостанции «Самарканд» и от 19,5% до 68,9% — по метеостанции «Андижан») и уменьшается часть, расходуемая на физическое испарение (соответственно 44,8—11,5; 43,6—18,8 и 49,5—10; рис. 3);

3) эффективная часть осадков невегетационного периода составляет от 50 до 90% общего их количества, причем меньшая цифра относится к годам с осадками меньше нормы и большая — к годам с осадками больше нормы;

4) с увеличением количества годовых осадков повышается их ирригационная эффективность. В рассмотренном примере коэффициент ирригационного использования атмосферных осадков (k_a) может составить от 0,63 до 0,93 (рис. 4).

Возвратные воды

Возвратными водами в районах орошаемого земледелия принято считать воды, поступающие с полей через коллекторно-дренажную и сбросную сеть в источники орошения. Воды эти называются возвратными потому, что они уже были учтены при водозаборе на орошение и вновь вернулись в источник, чаще всего с повышенной минерализацией и загрязненными. Термин «возвратные воды» под таким определением вошел в научную литературу. В состав возвратных вод входит:

- часть фильтрационных вод из оросительных каналов;
- дренажный сток с орошаемых массивов;
- сток поверхностных сбросов с орошаемых земель и сбросов межхозяйственных и внутрихозяйственных оросительных каналов;
- часть стока сбросов промывных поливов;
- грунтовые воды, выклинивающиеся в коллекторно-дренажную и сбросную сеть;
- не используемая для орошения часть стока притоков;
- сток, формирующийся за счет атмосферных осадков внутри орошаемой территории.

Между тем, к числу собственно возвратных вод относятся только первые четыре составленные приведенного перечня, так как они обычно учитываются при водозаборе на орошение и, попадая вновь в источники орошения ниже по течению, становятся вторичными водными ресурсами территории. Последние же три перечисленных источника являются первичными водными ресурсами и отнести их к категории возвратных нельзя. Тем не менее, при существующей методике оценки возвратных вод они учитываются в составе последних. Следовательно, термин «возвратные воды» в современном его понимании — чисто условный.

Даже в таком обобщенном виде возвратные воды изучены слабо, методика их расчета отсутствует. Данные практических наблюдений немногочисленны.

Проанализируем данные литературы о возвратных водах в бассейне р. Зарафшан.

Первая публикация по исследованию возвратных вод в бассейне Зарафшана принадлежит И. М. Луценко (1935). Отмечая большую практическую значимость возвратных вод, И. М. Луценко делает попытку количественно оценить их

для бассейнов Зарафшана, Сурхандарьи и Кашкадарьи и предлагает расчетные формулы. По его расчетам, добавочные воды в бассейне р. Зарафшан на участке Дупули—Каракуль в среднем за период 1926—1932 гг. составили $2,71 \text{ км}^3$ в год.

В 1936 г. вышла в свет вторая работа по этому вопросу — «Исчисление выклинивающихся вод в бассейнах юго-западных рек Узбекистана» А. В. Бостонджогло, В. Л. Шульца и А. П. Стружинского. Под выклинивающимися водами авторы работы подразумевали грунтовые воды, выклинивающиеся в русла рек, поверхностный сброс воды в русла рек из орошаемых районов, а также грунтовые воды, поступающие в оросительные системы внутри орошаемых районов (и там же используемые) и не достигающие русел рек. Они справедливо считали, что раздельная количественная оценка этих вод по источникам формирования невозможна ввиду недостаточной изученности гидрогеологических и иных условий района и приводили результаты расчета суммарного значения выклинивающихся вод: по бассейну р. Зарафшан на участке Дупули—Хазара в среднем за 1927—1930 гг. оно составило $2,81 \text{ км}^3$ в год, или 55% среднегодового стока реки в створе Дупули.

Н. М. Решеткина в работе «Регулирование и использование грунтовых вод долины р. Зарафшан» (1952) изложила подробную гидрогеологическую характеристику бассейна, привела результаты расчетов баланса грунтовых вод по году 75%-ной обеспеченности (1936—1937 гг.) для трех участков и сделала попытку раздельной оценки грунтовых вод по источникам формирования. Н. М. Решеткина считает, что в составе грунтовых вод (на участке Раватходжа—Дамходжа) имеется 46% фильтрационных вод из оросительных систем, 20% — таких же вод из русел рек, 26% — вод подземного притока из предгорных равнин.

По данным В. П. Светицкого (1967), возвратные воды в бассейне р. Зарафшан в среднем за 1940—1963 гг. составляли в пределах Самаркандской области $1,14 \text{ км}^3$ в год, Бухарской — $0,18$, а в целом по бассейну р. Зарафшан — $1,32 \text{ км}^3$ в год, что составляет 26% от среднегодового стока реки в створе Дупули.

В упомянутых работах, независимо от принятой авторами терминологии, речь идет о возвратных водах, состоящих из всех перечисленных выше видов вод. Это объясняется тем, что оценку величины возвратных вод авторы производили методом руслового баланса на основе анализа фактически наблюдаемых расходов воды по соответствующим створам реки. Причины резкой разницы в данных о количестве возвратных вод у разных авторов ($1,32$ — $2,81 \text{ км}^3$ в год) сле-

дует искать в том, что во-первых, для анализа ими были приняты разные годы в промежутке с 1926 по 1963 г., во-вторых, среднегодовая величина возвратных вод была выведена за разные интервалы времени (с 1926 по 1932, с 1927 по 1930, с 1940 по 1963 и за 1936—37 гг.).

Зарафшанская ирригационная система на протяжении этих лет не оставалась стабильной, она расширялась и совершенствовалась. Например, в результате реконструкции оросительной сети сократилась протяженность оросительных каналов с 27,6 до 14,3 тыс. км (1964 г.); с 8,0 до 76,7 км увеличилась протяженность оросительных каналов с бетонной одеждой (1966 г.); возросла с 0,8 до 4,4 тыс. км протяженность межхозяйственной и внутрихозяйственной коллекторно-дренажной сети (1966 г.); количество инженерных гидротехнических сооружений на оросительных системах вырос-

Таблица 11

Год	Площадь под хлопчатником, тыс. га, по области		Урожайность хлопчатника, ц/га, по области	
	Самаркандской	Бухарской	Самаркандской	Бухарской
1928	57	63	8,1	10,3
1930	90	111	—	—
1937	—	—	11,4	11,3
1940	110	127	—	—
1947	—	—	10,7	9,4
1950	123	139	17,0	15,8
1960	158	146	19,6	14,9
1965	170	166	22,5	18,9

ло с 1937 (1939 г.) до 3476 (1966 г.) единиц; изменились структура посевов на орошаемых землях, урожайность хлопчатника (табл. 11) и других культур. Производство хлопка увеличилось за эти годы по Самаркандской области в 8,9 и по Бухарской в 5,3 раза.

Если к сказанному добавить, что годы, принятые авторами упомянутых исследований для расчета возвратных вод в бассейне р. Зарафшан, отличаются друг от друга водностью и внутригодовым распределением стока рек, величиной и внутригодовым распределением атмосферных осадков, метеорологическими, агротехническими и другими условиями, то становится ясным, что полученные ими результаты несопоставимы и не адекватны современным величинам возвратных вод в этом бассейне. Ценность их исследований заключается в том, что они дают общее представление о порядке величин возвратных вод в орошаемых районах, указывают на

огромную значимость этих вод в народном хозяйстве и на необходимость тщательного изучения закономерности формирования данных водных ресурсов с целью разработки рекомендаций по эффективному их использованию.

Говоря о внутренних водных ресурсах орошаемой территории — и первичных, и вторичных (собственно «возвратных»), — следует отметить, что не все они и не во всех случаях попадают в источники орошения для последующего использования. Определенная часть их остается внутри орошаемой территории в виде внутрипочвенной влаги, расходуемой на испарение с почвы и на транспирацию. При отсутствии условий (естественных или искусственных) для дренирования, некоторая часть этих ресурсов уходит на пополнение грунтовых вод. Попутно отметим, что опубликована рекомендация по искусственному аккумулярованию водных ресурсов в грунтах (Кенесарин, Ходжибаев, 1964). По мнению авторов рекомендации, такой способ аккумулярования воды в условиях жаркого климата наиболее продуктивен, ибо сводится на нет испарение с водной поверхности, происходящее на обычных наземных водохранилищах. Целесообразность этой рекомендации должна быть доказана технико-экономическими расчетами. В пустынных районах Туркмении сотрудники Института пустынь АН Туркм. ССР успешно проводят эксперименты по аккумулярованию атмосферных осадков в грунтах с последующим механическим подъемом воды для водоснабжения пастбищ и оазисного орошения.

Возвращаясь к внутренним водным ресурсам орошаемой территории, отметим, что часть их, которая уходит на пополнение грунтовых вод, не относится к категории безвозвратных потерь. В определенных условиях эти ресурсы могут быть использованы для орошения, обводнения или водоснабжения населенных пунктов. На орошаемой территории могут иметь место (и, к сожалению, зачастую наблюдаются на практике) и непроизводительные потери внутренних водных ресурсов. Это — сброс возвратных вод в естественные понижения местности (Ариасайская, Денгизкульская, Сарыкамышская и другие впадины) и непродуктивное их расходование на испарение. К непроизводительным потерям следует отнести и потери на испарение с водной поверхности, происходящие в коллекторно-дренажной и сбросной сети при транспортировании возвратных вод от места формирования до места впадения в источники орошения.

При анализе элементов водного баланса орошаемой территории мы уже рассматривали условия формирования и количественную характеристику отдельных составляющих возвратных вод (дренажный сток, внутрипочвенная влага, филь-

трация и сбросы из оросительных каналов, сток атмосферных осадков и другие).

Остановимся еще на одной составляющей возвратных вод, — на не используемой для орошения части стока притоков.

Известно, что сток всех притоков, впадающих в реки Средней Азии в долинной части территории, в вегетационный период полностью разбирается на орошение. Многие из притоков уже давно потеряли видимую связь с реками, куда они когда-то впадали. Таковы все притоки Сырдарьи и Карадарьи в пределах Ферганской долины, все реки юго-западного Узбекистана, являющиеся притоками Амударьи, и т. д. Однако, это обстоятельство не дает права прийти к заключению, что все названные притоки абсолютно оторваны от основных рек и не доносят до них свои воды.

Изменчивость стока рек в многолетнем разрезе и неполное соответствие бытового режима рек режиму водопотребления на орошение зачастую приводят к тому, что часть стока вегетационного периода не потребляется для целей ирригации, а сток невегетационного периода почти совсем не используется на нужды орошения. Следовательно, свободный от ирригации сток притоков через коллекторно-дренажную и сбросную сеть, а в отдельных случаях и подземным путем, поступает в основные реки. Эти воды могут теряться и безвозвратно, если нет условий для их транспортирования до основных рек. В таких случаях условия следует создать (если это технически возможно и экономически целесообразно) искусственно. Количественную характеристику свободного стока притоков можно получить расчетным путем, о чем будет сказано в главе III.

Таким образом, можно констатировать, что:

возвратные воды являются дополнительными и очень существенными водными ресурсами орошаемых районов;

для достоверной количественной оценки возвратных вод необходимо анализировать условия формирования их составляющих и динамику изменения этих составляющих под влиянием антропогенных факторов;

для повышения эффективности использования возвратных вод необходимо ликвидировать все непроизводительные потери;

возвратные воды, попадая в источники орошения, участвуют в трансформировании режима последних. Следовательно, при проектировании и эксплуатации ВХС необходимо учитывать влияние возвратных вод на режимы и параметры элементов системы;

оросительную способность источников орошения необходимо вычислять с учетом возвратных вод.

Норма водоподачи на орошаемое поле

Выше было показано, что при выборе поливных норм нетто необходимо учитывать все виды потерь с орошаемого поля. Оросительная норма нетто состоит из суммы поливных норм. Срок первого вегетационного полива определяется в соответствии с запасами влаги в активном слое почвы к началу вегетационного периода. Общее количество и сроки последующих поливов устанавливаются на основе динамики расходования «мобильных» запасов влаги в активном слое почвы. Если в межполивной период «мобильные» запасы влаги в почве пополняются из других источников — за счет осадков, выпадающих на орошаемое поле в течение вегетационного периода, или пресных грунтовых вод при близком их залегании (субирригация), — то сроки очередных поливов соответственно отодвигаются и сокращается общее число поливов. Таким образом, оросительная норма нетто не может характеризовать суммарный удельный расход воды с орошаемого поля в течение всего вегетационного периода. Однако для каждого вида и сорта растений при данных климатических, почвенных, гидрогеологических условиях, при стабильной агротехнике и неизменном способе полива оросительная норма нетто является более или менее постоянной величиной. Этого нельзя сказать о норме брутто, ибо оросительная норма брутто, учитывающая все виды потерь в ирригационной сети, подводящей воду от источников орошения до орошаемого поля, изменяется в довольно широких пределах в зависимости от величины этих потерь.

Для определения годовой нормы водоподачи на орошаемое поле необходимо прибавить к оросительной норме брутто нормы всех видов поливов в невегетационный период с учетом потерь в подводящей сети.

Таким образом, норму водоподачи на поле следует считать основным расчетным элементом при установлении среднегодового размера водозабора из источников орошения на орошаемую территорию и при расчете оросительной способности зарегулированных источников.

* * *

*

Анализ всех приходных и расходных элементов водного баланса орошаемой территории позволяет:

установить оптимальные поливные и оросительные нормы и рациональный режим орошения сельскохозяйственных культур;

определить норму водоподачи на орошаемое поле и рассчитать размеры и режим водозабора из источников орошения;

рассчитать потенциально возможные размеры и режим возвратных вод с орошаемой территории;

наметить конкретные меры по повышению степени использования водных ресурсов;

разработать рекомендации по оптимальному проектированию подводящей и отводящей искусственной гидрографической сети (магистральных и распределительных каналов и сооружений на них, коллекторно-дренажной и сбросной сети и сооружений на них).

Глава III

МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ЭВМ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ ОРОШАЕМЫХ РАЙОНОВ

Внедрение в практику водохозяйственных расчетов современных методов математического моделирования и средств вычислительной техники открывает широкую перспективу для решения многих актуальных задач в этой области.

Первые работы по математическому моделированию водохозяйственных задач относятся к 1953 г. Начиная с этого года в США проводились эксперименты на моделях по управлению режимом водохранилищ на р. Миссури. Ставилась узкая эксплуатационная задача — исследовать режим работы шести крупных водохранилищ с заданными параметрами и местоположением с точки зрения получения максимального количества электроэнергии на гидроэлектростанциях (ГЭС). Результатом исследования было математическое описание режима работы и составление программы для цифровых вычислительных машин типа УНИВАК-1, использующих математический аппарат вычисления переменных с помощью линейного программирования или множителей Лагранжа (Маас, Хафшмидт, Дорфман, Марглин, Фойер, 1966). Попытка использовать эту модель для более сложного бассейна р. Колумбия показала недостаточность памяти вычислительных машин, имевшихся в то время в эксплуатации в США. После появления в 1954 г. вычислительной машины ИБМ-650 для нее была составлена по бассейну р. Колумбия упрощенная программа, по которой рассчитывался режим работы системы за месяц.

В 1955 г. Моррис и Аллан (Morrice and Allan, 1959) провели моделирование на ЭВМ ИБМ-650 долины Нила. Задача заключалась в определении таких комбинаций 17 имеющихся водохранилищ и режимов их работы, которые обеспечили бы максимальное использование водных ресурсов для целей ирригации.

В 1962 г. группа ученых США (А. Маас, М. Хафшмидт, Р. Дорфман, С. Марглин и др.) по Гарвардской водной про-

грамме широко изучала вопросы проектирования схем комплексного использования водных ресурсов с применением ЭВМ.

В течение последних 10—15 лет методы решения водохозяйственных задач на ЭВМ с возрастающей интенсивностью разрабатываются во многих странах мира.

В СССР широкое применение ЭВМ нашли для анализа режимов и решения разнообразных задач при проектировании и эксплуатации электроэнергетических систем. Так, на ЭВМ успешно решаются задачи оптимизации режимов работы районных и городских электрических сетей и энергетических систем, осуществляются расчеты динамической и статистической устойчивости, установившихся электрических режимов, токов короткого замыкания, электромеханических переходных процессов в крупных энергосистемах и т. д.

Первые попытки применения ЭВМ для водохозяйственных расчетов в СССР относятся к началу 60-х годов (Дунин-Барковский, 1967, 1968). Начиная с 1964 г. в народнохозяйственный план в числе важнейших проблем стали включать разработку методов проектирования водохозяйственных мероприятий с применением средств вычислительной техники.

В настоящее время на ЭВМ осуществляются расчеты по: планировкам земель; составлению хозяйственных планов водопользования; определению потенциальной оросительной способности рек; выбору оптимального варианта использования орошаемых земель; определению оптимального объема регулирования стока рек для целей ирригации; осаждению наносов в отстойниках; гидравлике каналов, дренажных систем и сооружений; региональной фильтрации; движению грунтовых вод и т. д. Разрабатываются способы и методы расчетов на ЭВМ: параметров и оптимального размещения скважин вертикального дренажа для получения заданного мелиоративного эффекта, движения солей по почвенному профилю при орошении засоленных земель, модуля дренажного стока при орошении и промывках, колебаний уровня грунтовых вод под влиянием орошения, суммарного испарения с орошаемых территорий, ирригационной эффективности атмосферных осадков, прогноза стока рек, оптимального распределения воды между компонентами водохозяйственного комплекса, экономической эффективности различных способов мелиорации земель, водного баланса орошаемой территории, режима работы ВХС.

С 1968 г. Институт электронных управляющих машин (Москва) совместно с Институтом кибернетики с ВЦ АН УзССР и Узгипроводхозом Министерства мелиорации и водного хозяйства УзССР ведет исследования по созданию автоматизированной ВХС бассейна р. Зарафшан, где сбор и

обработку информации, а также управление режимом работы системы будут осуществлять электронные управляющие машины.

В настоящей главе излагаются предварительные итоги нашего исследования по моделированию на ЭВМ водохозяйственных систем орошаемых районов.

При выборе системы для моделирования мы руководствовались следующими соображениями. Во-первых, моделируемая система должна отражать все характерные особенности ВХС орошаемых районов, т. е. должна иметь в своем составе, помимо орошаемых земельных массивов и водозаборных сооружений, гидроэлектрические станции в разных частях бассейна, водохранилища, расположенные параллельно и последовательно в разных частях бассейна, разветвленную коллекторно-дренажную и сбросную сеть и узлы сброса в источники орошения возвратных вод с орошаемых территорий. Во-вторых, система должна иметь перспективу для развития и расширения (наличие водных и гидроэнергетических ресурсов, пригодного для орошения свободного земельного фонда, возможности строительства водохранилищ по условиям топографии местности и т. д.). В-третьих, необходимы подробные сведения о параметрах всех существующих и перспективных элементов системы, длительный ряд наблюдений за стоком во всех расчетных створах и достоверная информация о всех видах водопотребления.

Наиболее подходящей, с точки зрения удовлетворения перечисленных требований, является Сырдарьинская ВХС. При построении модели этой системы сделан ряд допущений и упрощений:

сток всех притоков Карадарьи (ниже створа Кампыррат) разбирается на орошение. Между отдельными притоками осуществлены межбассейновые связи с помощью соединительных каналов. Поэтому все притоки Карадарьи условно объединены в один приток и рассматриваются в упрощенной схеме ВХС как один расчетный элемент. В зависимости от целевой задачи расчетные элементы могут быть составлены отдельно для левого и правого берегов. Аналогичным путем объединены в расчетные элементы все лево- и правобережные притоки Сырдарьи в пределах отдельных водохозяйственных районов;

в каждом водохозяйственном районе объединены в расчетные элементы все водозаборы из Нарына, Карадарьи и Сырдарьи. Причем, для последнего участка Сырдарьи допускается, что водозабор может быть осуществлен независимо от уровня воды в реке;

предполагается, что возвратные воды с орошаемых земель попадают в Карадарью и Сырдарью концентрированно в оп-

ределенных расчетных створах. Концентрация их происходит в пределах водохозяйственного района. Земли районов, как правило, орошаются из двух источников. Возвратные воды учитываются с площади каждого водохозяйственного района. Следовательно, в их состав входят воды и основных рек и их притоков. При этом допускается, что не используемый на орошение сток притоков попадает в составе возвратных вод в основные реки;

существующие и перспективные водохранилища на притоках рассматриваются как самостоятельный элемент ВХС только в тех случаях, когда это необходимо согласно целевым задачам.

В упрощенной модели ВХС не нашли отражения некоторые составляющие водохозяйственного комплекса, характерные для реальных систем орошаемых районов. Наиболее существенные из них:

1. Промышленное и коммунально-бытовое водопотребление. Качественно этот вид водопотребления идентичен с ирригацией, но с гораздо меньшими внутригодовыми колебаниями графика потребления воды и значительно большей долей возвратных вод; количественно же это водопотребление многократно меньше, чем водопотребление на орошение. В рассматриваемой нами ВХС промышленное и коммунально-бытовое водопотребление составляет, по данным генеральной схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов (1965 г.), до 2 км^3 в год.

2. Регулирование паводка. Цель такого регулирования — предотвращение затопления земель в период прохождения паводка. Одним из возможных средств достижения этой цели является аккумулятирование паводочных расходов и ограничение, таким образом, пусков воды в районы возможного затопления. Аккумулятирование воды в невегетационный период и в период прохождения по реке повышенных расходов — главная задача регулирования стока рек водохранилищами для целей ирригации. Следовательно, включенный в упрощенную схему вид регулирования стока одновременно решает и задачи регулирования паводка.

3. Водный транспорт. Транспортное значение рек Средней Азии невелико. Особенно это относится к Сырдарье. По-видимому, дальнейший рост водозабора на орошение земель приведет к прекращению транспортного использования этой реки.

4. Рыбное хозяйство. Рыбный промысел в условиях Средней Азии развит, главным образом, на Аральском море. Рыболовство здесь базируется в основном на проходных и полупроходных рыбах, которые по условиям размножения связаны с Сырдарьей и Амударьей. Дальнейшее развитие

орошения земель в бассейнах этих рек, связанное с регулированием их стока и увеличением безвозвратного водозабора, безусловно, затрагивает интересы рыбного хозяйства, ибо при этом изменяется гидрология дельт Сырдарьи и Амударьи, понижается уровень Аральского моря и, соответственно, сокращаются масштабы воспроизводства рыбных запасов. Для восполнения этих потерь можно предложить разведение рыб в водохранилищах, проведение соответствующих мелиоративных мероприятий в дельтах рек и т. д. Однако интересы рыбного хозяйства Аральского моря, по-видимому, не могут быть соблюдены за счет сокращения орошения в бассейнах Сырдарьи и Амударьи.

5. Спортивная, оздоровительная и т. п. функции рек, водохранилищ и каналов. Эти цели могут быть достигнуты без изменения режима работы ВХС, так как они не требуют изъятия воды из источников.

6. Качество воды. В настоящее время воды всех рек Средней Азии по качеству пригодны для орошения земель. Больше того, специальными экспериментальными исследованиями доказана возможность использования для орошения слабоминерализованных грунтовых и возвратных вод (Ибрагимов, 1964; Легостаев, 1961; Рачинский, 1965 и др.). Тем не менее, проблема качества воды из года в год становится все более острой. Водные источники загрязняются повсеместно за счет сброса в них неочищенных или недостаточно очищенных коммунально-бытовых и промышленных сточных вод. В условиях орошаемых районов к этому добавляются еще ядохимикаты, применяемые для борьбы с вредителями сельскохозяйственных культур, дефолианты (хлопковые посевы Узбекистана в течение года получают от 100 до 150 тыс. т ядохимикатов, дефолиантов и гербицидов) и легкорастворимые минеральные соли, выносимые дренажным стоком с орошаемых территорий и сбрасываемые в реки. Вынос солей увеличивается в связи с развитием орошения на засоленных землях и расширением строительства коллекторно-дренажной сети. В Хорезмской области УзССР, например, после увеличения удельной протяженности этой сети с 3,4 пог. м/га в 1947 г. до 21,6 в 1966 г. общий годовой вынос солей за пределы орошаемой территории через дренажные системы составляет 18,2 млн. т. Запас солей только в 20-метровом верхнем слое грунта на отдельных участках Голодной степи и центральной Ферганы достигает 5 тыс. т/га.

Последний вопрос является предметом специальных исследований.

Все перечисленные допущения и упрощения, исключаящие из рассмотрения ряд компонентов водохозяйственного комплекса и множество мелких, малозначительных факто-

ров, учет которых значительно осложнил бы математический анализ и сделал бы труднообозримыми результаты исследования, по нашему мнению, не искажают характерных особенностей ВХС орошаемых районов.

Упрощенная линейная схема Сырдарьинской ВХС

В упрощенную линейную схему ВХС (см. рис. 1) в общем виде входят:

реки Нарын и Карадарья (составляющие р. Сырдарья) и четыре концентрированных притока (лево- и правобережные притоки Карадарьи ниже створа Кампыррават; лево- и правобережные притоки Сырдарьи в пределах Ферганской долины; притоки Сырдарьи между створами Кайраккумского и Чардаринского водохранилищ и на участке ниже Чардаринского водохранилища);

пять расчетных водозаборных узлов для орошения пяти земельных массивов: 1) из Нарына для орошения 58 тыс. га земель в Учкурганском треугольнике. Водозабор осуществляется с верхнего бьефа Учкурганской ГЭС; 2) из Карадарьи. Водозабор осуществляется ниже строящегося Андижанского водохранилища. Земли, подкомандные этому узлу (368 тыс. га), орошаются из двух источников — Карадарьи и ее лево- и правобережных притоков; 3) из Сырдарьи в пределах Ферганской долины. Водозабор осуществляется выше Кайраккумского водохранилища. Земли, подкомандные этому узлу (554 тыс. га), орошаются также из двух источников — Сырдарьи и ее лево- и правобережных притоков; 4) из Сырдарьи в пределах Голодностепского и Чирчик-Ахангаран-Келесского (ЧАКИР) водохозяйственных районов. Водозабор осуществляется из Сырдарьи на участке между Кайраккумским и Чардаринским водохранилищами. Земли, подкомандные этому узлу (760 тыс. га), орошаются также из двух источников — из Сырдарьи и ее притоков. В связи с тем, что на этом участке Сырдарьи расположена Фархадская ГЭС, при энергетических расчетах необходимо включить в схему два самостоятельных водозаборных узла — из верхнего и из нижнего бьефов Фархадской ГЭС; 5) из Сырдарьи для орошения земель, расположенных в низовьях Сырдарьи и в пределах Арысь-Туркестанского (АРТУР) водохозяйственного района. Земли, подкомандные этому узлу (237 тыс. га), орошаются также из двух источников — из Сырдарьи и ее притоков. Орошаемые земли, расположенные в верховьях Нарына (130 тыс. га), Карадарьи (40 тыс. га) и притоков (30 тыс. га), не вошли в расчет;

пять расчетных узлов возвратных вод с орошаемых территорий. Концентрация и привязка этих узлов произведены по расчетным водохозяйственным районам;

четыре водохранилища: действующие Кайраккумское и Чардаринское, строящиеся Токтогульское (на Нарыне) и Андижанское (на Карадарье);

шесть гидроэлектростанций: действующие Учкурганская (на Нарыне), Кайраккумская, Фархадская, Чардаринская (на Сырдарье) и строящиеся Токтогульская (на Нарыне), Андижанская (на Карадарье).

Оценка водных ресурсов рек, входящих в ВХС, произведена по данным многолетних гидрометрических наблюдений в створах, замыкающих зону формирования стока этих рек. Суммарные величины среднемесячных расходов Нарына, Карадарьи и всех четырех расчетных притоков за 1933—1962 гг. приводятся в приложении II.

Подземный приток, попадающий в контур ВХС в обход расчетных гидрометрических створов, учитывается в составе возвратных вод (по Ферганской долине — в размере 1 км^3 в год, по Голодной степи и Чирчик-Ахангаран-Келесскому водохозяйственному району — в размере $0,6 \text{ км}^3$ в год. Сток атмосферных осадков с орошаемой территории ВХС также учитывается в составе возвратных вод.

Расчет выполняется для двух норм водоподачи на орошаемое поле — современных и перспективных. Информация о современных нормах получена из специальных водобалансовых исследований по бассейну Сырдарьи, проведенных институтами водных проблем АН СССР, «Средазгипроводхлопок» и САНИИРИ. В сводном виде эта информация дана в табл. 12 и 13.

Современная норма водоподачи (брутто) на орошаемое поле характеризует водозабор из источников орошения на комплексный гектар орошаемой площади в районах с хлопково-люцерновым направлением использования земель и является интегральным выражением всех гидродинамических явлений, протекающих на этих землях, для средних почвенно-климатических условий и уровня ведения хозяйства. Данные о структуре посевных площадей ВХС, принимаемые неизменными за все расчетные годы, приводятся в табл. 14. Средние многолетние величины метеозаэлементов по нескольким станциям, расположенным в бассейне Сырдарьи, даны в табл. 15.

Нормы, приведенные в табл. 12 и 13, нельзя признать оптимальными. Больше того, можно и, видимо, нужно, считать их расточительными. Однако при современном состоянии оросительных систем и уровне агротехники эти нормы обеспечивают получение достаточно высоких и устойчивых урожа-

ев сельскохозяйственных культур (25—30 ц хлопка с гектара) и сохранение плодородия орошаемых земель. Следовательно, учет этих норм при анализе работы ВХС необходим

Таблица 12

Водохозяйственный район	Орошаемая площадь, тыс. га	Норма водоподачи на орошение, м³/га		Норма возвратных вод	
		брутто	нетто	м³/га	% от нормы водоподачи на орошение
Ферганская долина	980	17 100	9 400	7 700	45
Голодная степь	410	14 900	11 000	3 900	26
ЧАКИР	350	17 200	10 700	6 500	38
АРТУР	130	18 500	17 000	1 100	8
Низовья	107	47 500	47 500		

и целесообразен, ибо они отражают действительную картину и могут быть приняты как вариант возможного верхнего предела водопотребления в системе.

Таблица 13

Водохозяйственный район	Норма водоподачи на орошаемое поле, м³/га	Месячная норма водоподачи на орошаемое поле, % от годовой											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Ферганская долина	15 000*	0,5	0,5	1,7	6	9	18	23	21	10	5,1	5,2	0
Голодная степь	14 900	0,0	0,0	0,0	6,2	11,7	18,7	22,2	20,4	9,1	5,8	5,9	0
ЧАКИР	14 500**	0,73	0,73	0,73	7,5	12,1	18,8	22,3	19,4	8,7	3,7	4,5	0,8
АРТУР	18 500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Низовья	47 500	3,1	3,1	8,7	18,3	17,3	11,9	10,8	10,0	7,0	3,4	3,3	3,2

* Норма водоподачи (брутто) за вычетом стока притоков в не вегетационный период.

** Норма водоподачи (брутто) за вычетом потребностей гидроэнергетики.

Информацию о перспективных нормах водопотребления ирригацией мы получили на основе анализа водного баланса орошаемой территории. Структура посевных площадей по всем расчетным водохозяйственным районам принята стабильной. Ирригационные нормативы установлены для средних по водохозяйственным районам климатических условий применительно к практикуемым в настоящее время спосо-

бам и технике полива, современным агротехническим приемам и особенностям возделываемых культур, исходя из задачи получения более высоких, чем в настоящее время, урожаев.

Многочисленными опытами установлено, что в среднем на 1 ц урожая хлопка приходится примерно 1,5 ц сухой вегетативной массы. В настоящее время урожай хлопка в Узбекистане составляет 25 ц/га. Расчет проводится для урожая в 30 ц/га. При этом урожае вегетативная масса составит

Таблица 14

Водохозяйственный район	Состав основных культур, %					
	зерновые		хлопчатник	овощи	кормовые и сенокосы	приусадебные насаждения
	всего	в том числе рис				
Ферганская долина	7	1,0	62	2	16	13
Голодная степь	15	1,5	52	3	15	15
ЧАКИР	18	3,0	43	7	15	17
АРТУР	18	0,5	24	4	35	19
Низовья	54	40	нет	3	39	4

45 ц/га, а коэффициент транспирации хлопчатника, характеризующий продуктивный расход влаги растением в течение всего вегетационного периода, — 600 единиц воды на каждую единицу сухой массы всего урожая (хлопок плюс вегетативная масса). Следовательно, общий расход физиологически потребной воды (T_n) в этом случае будет равен $(3+4,5) \times \times 600 = 4500 \text{ м}^3/\text{га}$.

Экспериментально установлено, что расход воды на физическое испарение I_v с хлопкового поля за период вегетации составляет примерно одну треть суммарного испарения E_v . Для перспективных расчетов примем, что I_v составляет 25% от E_v , т. е. $1500 \text{ м}^3/\text{га}$.

Таким образом, расход влаги с хлопкового поля на суммарное испарение в течение всего вегетационного периода при урожайности в 30 ц/га составляет $6000 \text{ м}^3/\text{га}$. Так же определяется расход воды на суммарное испарение с орошаемых полей, занятых другими культурами. Среднюю расчетную величину расхода воды на суммарное испарение с комплексного гектара орошаемой площади каждого водохозяйственного района исследуемой ВХС устанавливают исходя из структуры посевных площадей.

На основе соображений, изложенных в главе II, дифференцированно по каждому водохозяйственному району применительно к комплексному гектару орошаемой площади

Метеостанция	Данные по месяцам												Среднее		
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	за год	за XI-III	за IV-X
Температура воздуха, °C															
Ош	-3,0	-1,2	5,9	13,1	17,6	21,9	24,3	23,1	17,8	10,9	4,1	-0,7	11,2	1,0	18,4
Фергана	-2,7	0,2	7,5	15,2	20,4	24,5	26,4	24,3	19,0	11,8	5,4	0,6	12,8	2,2	20,4
Мирзачуль	-2,0	1,5	8,0	15,1	21,1	25,4	26,8	24,4	18,9	12,7	5,8	0,8	13,2	2,8	20,6
Ташкент	-1,1	1,5	7,8	14,7	20,2	25,3	27,4	25,5	19,7	12,7	6,7	1,8	13,5	3,4	20,8
Казалинск	-11,7	-10,3	-1,9	10,0	18,8	23,9	26,1	23,8	16,9	8,2	-0,6	-7,8	8,0	-6,4	18,2
Осадки, мм															
Ош	31	30	47	49	44	24	12	5	6	22	35	29	334	172	162
Фергана	20	16	27	18	19	10	5	3	2	12	19	18	169	100	69
Мирзачуль	41	41	52	45	30	10	2	2	4	20	35	37	319	206	113
Ташкент	48	44	64	54	32	11	4	1	3	15	38	48	372	242	130
Казалинск	10	10	13	12	12	6	5	7	7	13	11	12	118	56	62
Относительная влажность воздуха, %															
Ош	68	68	68	63	61	50	47	47	53	61	70	75	61	70	55
Фергана	78	83	71	63	52	46	49	49	52	61	73	80	63	77	53
Мирзачуль	77	75	76	66	57	47	46	50	53	60	71	80	63	76	54
Ташкент	71	71	64	61	54	44	41	43	45	55	65	72	57	69	49
Казалинск	83	83	78	55	45	44	46	47	51	61	73	82	63	80	50

установлены расчетные значения дренажного стока за вегетационный и невегетационный периоды и нормы всех видов поливов в невегетационный период. Величины к. п. д. оросительных каналов установлены несколько выше фактического значения их в настоящее время.

Предполагается, что все относительные потери оросительной воды с орошаемых полей и из ирригационных каналов в составе возвратных вод попадают в источники орошения и повторно используются в ВХС. Принятые нами для расчета перспективные нормы приведены в табл. 16.

Т а б л и ц а 16

Элементы водного баланса орошаемой территории	Водохозяйственный район				
	Ферган- ская долина	Голод- ная степь	ЧАКИР	АРТУР	ни- зовья
Расход воды с комплексного гектара					
На транспирацию, $\text{м}^3/\text{га}$	4500	3750	4500	4000	7000
На физическое испарение:					
в % от суммарного	25	25	25	25	30
в $\text{м}^3/\text{га}$	1500	1250	1500	1350	3000
На суммарное испарение, $\text{м}^3/\text{га}$	6000	5000	6000	4350	10000
На дренаж:					
в вегетационный период					
в % от оросительной нормы	20	20	10	20	15
в $\text{м}^3/\text{га}$	1500	1250	665	1100	1750
в невегетационный период					
в % от промывной нормы	50	50	20	10	10
в $\text{м}^3/\text{га}$	400	550	150	135	130
Приход воды на комплексный гектар					
в вегетационный период, $\text{м}^3/\text{га}$	7500	6250	6665	5450	11750
в невегетационный период:					
в % от годовой нормы	10	15	10	20	10
в $\text{м}^3/\text{га}$	830	1100	740	1360	1300
За год:					
нетто, $\text{м}^3/\text{га}$	8330	7350	7400	6800	13050
брутто, $\text{м}^3/\text{га}$	11900	9200	10600	11300	22000

Внутригодовое распределение подаваемой на комплексный гектар орошаемой площади воды произведено нами в соответствии с потребностями в воде сельхозкультур по фазам их развития с учетом запасов влаги в почве к началу вегетационного периода, а также исходя из принятых в настоящее время сроков проведения невегетационных поливов в конкретных водохозяйственных районах (табл. 17).

Возвратные воды, формирующиеся за счет относительных потерь воды с орошаемого поля и из ирригационных каналов, и их внутригодовое распределение принимаются по данным,

показанным в табл. 18. Сток атмосферных осадков внутри орошаемой территории учитывается в составе возвратных вод. Ориентировочные величины его установлены расчетным

Т а б л и ц а 17

Водохозяйственный район	Норма водоподачи (брутто) на орошение, м³/га	Распределение нормы по месяцам, % к годовой								
		III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Ферганская долина	11 900	0	5	7	19	26	22	11	5	5
Голодная степь	9 200	0	3	6	19	26	22	9	7	8
ЧАКИР	10 600	0	5	7	20	25	23	10	5	5
АРТУР	11 300	5	7	13	16	21	18	5	7	8
Низовья	22 000	3	10	16	21	20	18	5	5	2

путем на основе средней годовой нормы осадков, водно-физических свойств почв и средних климатических условий (табл. 19).

Т а б л и ц а 18

Водохозяйственный район	Норма возвратных вод, м ³ /га	Распределение нормы возвратных вод по месяцам, % от годовой									
		IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Ферганская долина	5 470	0	4,9	6,9	18,9	25,7	21,8	10,8	5,5	5,5	
Голодная степь	3 650	0	2,9	5,8	18,0	25,0	21,1	8,5	8,7	10	
ЧАКИР	4 015	0	5,2	7,3	20,4	25,7	23,6	10,4	3,7	3,7	
АРТУР	5 735	3	7,5	13,8	17,2	22,3	19,1	6,2	5,0	5,9	
Низовья	10 830	1	10,8	17,2	22,3	21,8	19,4	5,7	1,2	0,6	

Свободный от ирригации сток притоков учитывается в расчетах непосредственно.

Методика расчета на ЭВМ оросительной способности ВХС

Под оросительной способностью рек обычно принято понимать возможную величину площади, орошаемой за счет водных ресурсов данной реки.

Сток рек — фактор стохастический, поэтому понятие «оросительная способность» связано с нормативом «расчетная обеспеченность», или иными словами, оросительная способность рек должна определяться в каждом конкретном случае для вполне конкретной расчетной обеспеченности.

Расчетная обеспеченность — один из важнейших нормативов гидротехники. Ею определяются значения почти всех параметров водохозяйственной системы. Следовательно, ус-

тановление расчетной обеспеченности является чрезвычайно ответственной задачей водохозяйственных расчетов (Крицкий, Менкель, 1952).

В каждом конкретном случае целесообразное значение принимаемой обеспеченности должно определяться технико-экономическими расчетами. Методика таких расчетов достаточно хорошо разработана в области гидроэнергетики, чего нельзя сказать об ирригации. Поэтому в настоящее время в ирригации расчетную обеспеченность очень часто устанавливают директивным путем.

Таблица 19

Годохозяйственный район	Среднегодовой сток атмосферных осадков, $\text{м}^3/\text{га}$	Распределение стока атмосферных осадков по месяцам, $\text{м}^3/\text{га}$				
		XII	I	II	III	IV
Ферганская долина	1900	100	300	400	1100	0
Голодная степь	810	50	150	210	400	0
ЧАКИР	1500	100	250	370	780	0
АРТУР	1700	0	100	250	1200	150
Низовья	1600	0	0	280	870	450

Мы не касаемся экономической стороны вопроса, т. е. обоснования целесообразного значения расчетной обеспеченности в ирригации, а рассматриваем только технические приемы установления ее заданной величины.

Обычно в водном хозяйстве установление расчетной обеспеченности связывается с выбором расчетного года. Такой год выбирают исходя из обеспеченности стока по повторяемости в многолетнем ряду. В ирригации расчетным обычно принимают год со стоком 75% обеспеченности.

Между тем обеспеченность ирригации при естественном режиме рек обусловлена не величиной годового стока или стока вегетационного периода, а внутригодовым его распределением. Причем, водность года не связана с внутригодовым распределением стока (Шульц, 1965). Следовательно, определение нормативной обеспеченности ирригации исходя из обеспеченности стока принципиально неверно.

Размер возможной орошаемой площади в бассейне каждой реки при естественном ее режиме определяется расходом этой реки в критическую для ирригации декаду, месяц и т. п. Сопоставляя расходы критического периода каждого года с водопотреблением ирригации, мы можем отыскать размеры орошаемой площади со 100%-ной обеспеченностью (Захидов, 1968). Получим ряд значений площадей. Расположив эти значения в убывающем порядке, по упрощенной

формуле $p = \frac{m}{n} \cdot 100$ (m — порядковый номер члена ряда, n — число членов ряда), найдем искомое значение расчетной обеспеченности ирригации, следовательно, и искомое значение возможной орошаемой площади при любой заданной обеспеченности. Разумеется, такой расчет можно произвести только располагая достоверной информацией о водных ресурсах и о водопотреблении ирригации за длительный период.

Наиболее полную информацию о водных ресурсах можем получить по данным фактических гидрометрических наблюдений за стоком в створах рек, расположенных при их выходе из гор, где полностью учитывается весь сток с водосборной площади и режим рек не искажен хозяйственной деятельностью человека. К настоящему времени почти по всем рекам Средней Азии, используемым для орошения, накоплен непрерывный ряд гидрометрических наблюдений, длительность которых — от 25 до 50 лет. Эти данные публикуются в ежегодниках управлений гидрометслужб. Если по отдельным рекам, входящим в ВХС, число лет наблюдений недостаточно, гидрологический ряд должен быть искусственно удлинен тем или иным методом, например методом Монте-Карло.

Ирригация — сезонный водопотребитель, использующий воду в основном в вегетационный период. Начало и продолжительность вегетационного периода для разных сельскохозяйственных культур различны и зависят от биологических особенностей растений и от климата. Они изменчивы также для одного и того же растения в многолетнем разрезе и зависят от почвенно-мелиоративных условий и от метеорологической обстановки, складывающейся в районе орошения. Таким образом, вегетационный период, строго говоря, нельзя рассматривать как календарный и устойчивый период. Отсюда следует и другой вывод — изменчивым из года в год является также режим орошения. Тем не менее, отделом почвенно-мелиоративных исследований Института «Средазгипроводхлопок» на основе обобщения опыта орошения и проработок научно-исследовательских, проектных и других организаций, составлен унифицированный режим орошения для различных природных и ирригационно-хозяйственных условий хлопковой зоны бассейнов Сырдарьи и Амударьи, который можно применить при расчете оросительной способности ВХС Средней Азии. Информация об ирригационном водопотреблении здесь дается в виде оросительных норм и их распределения в течение сезона орошения. Осредненный график ирригационного водопотребления в водохозяйственном районе составляется на основе расчетных значений оро-

сительных норм, планируемого состава сельскохозяйственных культур и принятой схемы севооборота.

Для иллюстрации различия между расчетным годом по стоку и обеспеченностью ирригации приводим пример по р. Зарафшан.

Исходными данными о водных ресурсах служат фактически наблюдаемые среднемесячные расходы Зарафшана (по створу Дупули) за 1914—1963 гг., об ирригационном водопотреблении — оросительная норма $10\,000\text{ м}^3/\text{га}$ со следующим распределением в течение вегетационного периода ($\text{м}^3/\text{га}$): апрель — 400, май — 900, июнь — 2100, июль — 3000, август — 2800, сентябрь — 800.

Общепринятым методом определим год 75%-ной обеспеченности по стоку. Таким оказывается год с среднегодовым расходом $142\text{ м}^3/\text{сек}$. В расчетном 49-летнем гидрологическом ряду имеется четыре года с среднегодовым расходом, равным $142\text{ м}^3/\text{сек}$. Это — 1931, 1940, 1944 и 1963 гг.

Внутригодовое распределение расходов этих лет следующее:

Месяц	1931 г.	1940 г.	1944 г.	1963 г.	1950 г.
I	35,2	34,7	41,6	36,6	46,9
II	32,1	30,6	37,5	32,4	44,1
III	31,2	29,1	37,4	30,8	37,3
IV	45,2	40,0	50,3	47,3	36,8
V	88,7	117	159	117	114
VI	244	405	249	415	349
VII	423	375	452	399	455
VIII	362	324	345	282	413
IX	212	178	175	158	180
X	111	74,3	71,8	80,4	80,3
XI	64,4	56,5	51,6	56,2	54,0
XII	50,7	44,3	39,3	43,9	42,8
В среднем за год	142	142	142	142	154

Для сопоставления тут же приведены данные 1950 г., являющегося расчетным по обеспеченности ирригации.

Сравнивая водные ресурсы с водопотреблением и исходя из критического для ирригации месяца, определим размеры возможных орошаемых площадей. Оказывается, 1931 г. обеспечивает орошение 259 тыс. га, 1940 г. — 263, 1944 г. — 315, 1963 г. — 265 тыс. га. При этом из рассматриваемых четырех лет с 75%-ной обеспеченностью по стоку наиболее неблагоприятное для ирригации внутригодовое распределение его наблюдается в 1931 г.

Теперь определим расчетную обеспеченность ирригации по рекомендуемому нами методу. Для этого сопоставим водные ресурсы каждого года из 49-летнего гидрологического ряда с водопотреблением ирригации и, исходя из критического для ирригации месяца, определим размеры возможной орошаемой площади для каждого года. При этом получим ряд площадей со 100%-ной обеспеченностью.

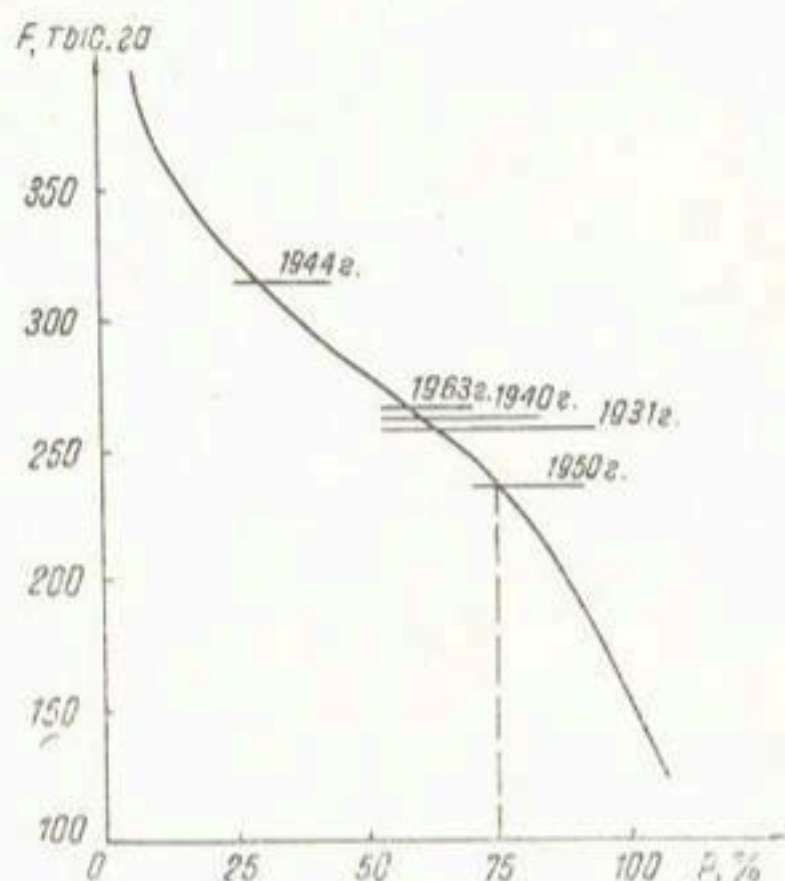


Рис. 5. Кривая обеспеченности ирригации.

Расчет производим на ЭВМ типа М-20. Для упрощения программирования за расчетный интервал принимаем стандартный месяц в 30, 44 суток.

Из полученного ряда с помощью уже упомянутой формулы $p = \frac{m}{n} \cdot 100$ легко составить зависимость размера орошаемой площади от обеспеченности ирригации: $F = f(p)$. Находим, что 75%-ной обеспеченности ирригации соответствует орошаемая площадь размером в 240 тыс. га. Такую обеспеченность имеет сток 1950 г. (рис. 5).

При расчете оросительной способности ВХС необходимо исходить из величины и состояния всех видов водных ресурсов системы в их совокупности.

Водные ресурсы ВХС складываются из ресурсов всех рек, входящих в систему, из динамических запасов подземных вод и из стока, формирующегося внутри орошаемой территории за счет как атмосферных осадков, так и собственно возвратных вод.

Оросительная способность ВХС определяется для заданной расчетной обеспеченности ирригации. При этом она может иметь несколько возможных значений: от минимального при естественном (бытовом) режиме источников до максимального при полном многолетнем регулировании стока рек.

Для формулировки экономико-математической модели задачи введем следующие обозначения:

- m — количество рек, входящих в ВХС;
- n — количество водохранилищ;
- s — количество расчетных орошаемых массивов (водохозяйственных районов);
- T — расчетный период (12 месяцев);
- F_j — площадь j -го массива ($j=1, 2, \dots, s$);
- F'_j — максимально возможный прирост орошаемых земель в j -м массиве;
- $\omega_{j,t}$ — норма водопотребления j -го массива в периоде t ($t=1, 2, \dots, T$);
- $\bar{\omega}_{j,t}$ — норма возвратных вод с j -го массива в периоде t ;
- $W_{i,t}$ — сток i -й реки в периоде t ($i=1, 2, \dots, m$);
- V_k — емкость k -го водохранилища ($k=1, 2, \dots, n$);
- W_k^t — объем воды в k -м водохранилище к концу t -го периода;
- X_j — приращение орошаемых земель в j -м массиве;
- $X_{i,j}^t, Y_{i,k}^t$ — стоки, поступающие из i -й реки в j -й массив и k -е водохранилище;
- $Z_{p,j}^t, U_{p,k}^t$ — стоки, поступающие из p -го водохранилища в j -й массив и k -е водохранилище;
- $f_{i,j}^t, v_{i,k}^t$ — стоки возвратных вод, поступающие из i -го массива в j -й массив и k -е водохранилище.

Граничные условия задачи формулируются следующим образом.

Приращение орошаемых земель j -го массива не может быть больше максимально возможного прироста

$$X_j \leq F'_j. \quad (22)$$

Удовлетворение потребности ирригации достигается равенством

$$\sum_l X_{l,j}^t + \sum_k Z_{k,j}^t + \sum_l f_{l,j}^t = \omega_{j,t}(F_j + X_j). \quad (23)$$

При распределении ресурсов необходимо соблюдать выполнение условий

$$\sum_j X_{l,j}^t + \sum_k Y_{l,k}^t \leq W_{l,t}, \quad (24)$$

$$\sum_j Z_{k,j}^t + \sum_{\mu} U_{k,\mu}^t \leq W_k^{t-1} + \sum_l Y_{l,k}^t + \sum_{\mu} U_{\mu,k}^t + \sum_l v_{l,k}^t, \quad (25)$$

$$\sum_j f_{l,j}^t + \sum_k v_{l,k}^t \leq \bar{\omega}_{j,t}(F_j + X_j). \quad (26)$$

Ввиду ограниченности полезных емкостей водохранилищ требуется, чтобы

$$W_k^{t-1} + \sum_l Y_{l,k}^t + \sum_{\mu} U_{\mu,k}^t + \sum_l v_{l,k}^t - \sum_j Z_{k,j}^t - \sum_{\mu} U_{k,\mu}^t \leq V_k. \quad (27)$$

Разумеется, переменные величины не могут принять отрицательных значений, т. е.

$$X_j, X_{l,j}^t, Y_{l,k}^t, Z_{k,j}^t, U_{k,\mu}^t, f_{l,j}^t, v_{l,k}^t \geq 0. \quad (28)$$

Цель задачи выражается функционалом

$$\sum_j \alpha_j X_j \rightarrow \max, \quad (29)$$

где α_j — эффективность земель перспективного орошения в j -м массиве.

Задача может быть решена одним из известных методов математического программирования. Возникает затруднение из-за ее большой размерности. Однако благодаря специфическому виду матрицы решение может быть получено применением метода Петшиковского (Гольштейн, Юдин, 1966).

Применение методики рассмотрим на примере Сырдарьинской ВХС. Решение получено на ЭВМ М-220 и «Минск-22» для случаев, когда: а) сток рек, входящих в ВХС, не зарегистрирован; б) сток рек регулируется существующими двумя водохранилищами (Кайраккумским и Чардаринским); в) осуществляется полное годовичное регулирование стока.

Информация о водных ресурсах рассматриваемой системы дается в виде среднемесячных значений расходов воды в створах, замыкающих зону формирования стока рек, за 1933—1962 гг. (см. приложение II). Для расчета используются интегральные кривые стока, которые строятся по этим

среднемесячным значениям расходов воды, причем средне-месячные стоки пересчитываются в стоки за стандартный месяц (30, 44 суток). Это необходимо для упрощения расчетов на ЭВМ и не вносит в расчеты существенных ошибок.

Информация о возвратных водах дается в виде их норм с комплексного гектара орошаемой площади и распределения этих норм по месяцам в $\text{м}^3/\text{га}$ (см. табл. 18). Для получения фактических величин возвратных вод необходимо умножить эти нормы на размеры орошаемых площадей водохозяйственных районов. Повторно используемые ресурсы возвратных вод зависят от размеров и размещения орошаемых площадей в пределах ВХС. Вопрос оптимизации размещения перспективных площадей орошения связан с соответствующими технико-экономическими расчетами. В нашем примере $\alpha_j = 1$. При этом, имея в виду трудовые ресурсы и климатические особенности отдельных водохозяйственных районов системы, принимаем такую последовательность освоения: в первую очередь — все пригодные для орошения площади земель в пределах Ферганского (400 000 га), затем Голодностепского (640 000 га) и после этого — Чирчик-Ахангаран-Келесского (310 000 га) водохозяйственных районов.

Информация о стоке, формирующемся за счет атмосферных осадков внутри орошаемой территории, дается в виде среднегодовой нормы стока с комплексного гектара орошаемой площади и распределения этой нормы по месяцам (см. табл. 19).

Расчеты показали, что при естественном режиме водных источников, 75%-ной обеспеченности ирригации и современных нормах водоподачи на орошение оросительная способность Сырдарьинской ВХС составляет 1659 тыс. га земель со следующим размещением орошаемых площадей по водохозяйственным районам: Ферганская долина — 931 тыс. га, Голодная степь и Чирчик-Ахангаран-Келесский ирригационный район — 521; Арысь-Туркестанский район и низовья — 207 тыс. га.

Для аналогичных условий, но при полном годичном регулировании стока рек в створах существующих Кайраккумского и Чардаринского водохранилищ ВХС может оросить 2766 тыс. га земель. При этом орошаемые земли размещаются по водохозяйственным районам таким образом: Ферганская долина — 931 тыс. га, Голодная степь и ЧАКИР — 1562, АРТУР и низовья — 262 тыс. га; полезные ёмкости водохранилищ составляют: Кайраккумского — 7,3 км³ и Чардаринского — 1,7 км³.

При использовании в расчетах перспективных норм водоподачи на орошение оросительная способность системы значительно повысилась. Для случая, когда сток рек не заре-

гулирован, она составила 2 213 тыс. га земель. Увеличение размеров орошаемых площадей по водохозяйственным районам характеризуется при этом следующими цифрами: Ферганская долина — 1 137 тыс. га, Голодная степь и ЧАКИР — 651, АРТУР и низовья — 425 тыс. га.

Если осуществляется полное годовое регулирование стока рек в створах существующих водохранилищ, ВХС способна оросить 3 472 тыс. га земель, в том числе в пределах Ферганского водохозяйственного района — 1 137 тыс. га, в Голодностепском и Чирчик-Ахангаран-Келесском ирригационных районах — 1 660, в Арысь-Туркестанском районе и низовьях Сырдарьи — 675 тыс. га.

Полезные ёмкости водохранилищ составили: Кайраккумского — 5,2 км³ и Чардаринского — 4,3 км³. Уменьшение ёмкости Кайраккумского и увеличение Чардаринского водохранилищ объясняется тем, что земельный фонд, пригодный для орошения в районах, подкомандных Кайраккумскому водохранилищу, ограничен в размерах (1 660 тыс. га) и расширение орошаемых площадей произошло за счет фонда земель, расположенных ниже Чардаринского водохранилища.

При размещении водохранилищ в створах Кайраккум и Чардара не решается проблема орошения перспективных земель в Ферганской долине. Между тем эти земли расположены в районах, по климатическим условиям наиболее благоприятных для возделывания хлопчатника и обеспеченных трудовыми ресурсами. Для их освоения потребуется сооружение водохранилищ на Карадарье и Нарыне, что и осуществляется в настоящее время строительством Андижанского и Токтогульского водохранилищ.

Оптимизация режима работы ГЭС, входящих в ВХС орошаемых районов

При комплексном ирригационно-энергетическом использовании водных ресурсов в районах орошаемого земледелия режим водотока должен отвечать противоречивым требованиям. Ирригация заинтересована в высоких расходах воды в летний (вегетационный) период, а энергетика, наоборот, — в увеличении зимнего стока. Одновременное полное удовлетворение этих требований во многих случаях невозможно. Поэтому при составлении схем комплексного использования водных ресурсов в районах орошаемого земледелия прежде всего учитываются интересы ирригации, а энергетика носит подчиненный характер.

Разумеется, такое решение либо резко ограничивает энергетическое использование водотоков в легко доступных к освоению равнинной и предгорной частях, либо создает значительную летнюю сезонную мощность. Указанное ограничение

имеет место в том случае, если ГЭС строится в расчете лишь на круглогодичную обеспеченную мощность.

Вопросы рационального использования сезонной мощности в энергетической системе и методика определения оптимальных параметров ГЭС, проектируемых в составе ВХС орошаемых районов, уже рассматривались (Захидов, 1959). Здесь речь пойдет о режиме эксплуатации построенных в зоне орошения ГЭС. Ясно, что эти станции вынуждены работать по графику, устанавливаемому в соответствии с требованиями ирригации, т. е. с соблюдением условий (22) — (28). Если допустить, что вырабатываемая ими электроэнергия может быть полностью реализована энергетической системой, то интерес будет представлять максимизация количества этой энергии. При этом целевая функция будет иметь вид

$$\sum_t \sum_k \left(\sum_j Z_{k,j}^t + \sum_p U_{k,p}^t \right) P_{kt} \rightarrow \max, \quad (30)$$

где $P_{k,t}$ — переводной коэффициент воды в электроэнергию для ГЭС k -го водохранилища в периоде t . Естественно, что $P_{k,t}$ определяется по напору ГЭС, который является переменным и зависит от объема наличной воды в водохранилище, иначе говоря,

$$P_{k,t} = \varphi(H_{k,t}) = \varphi(W_k^t),$$

где $H_{k,t}$ — напор ГЭС k -го водохранилища в периоде t .

Заменяя многоиндексные переменные переменными с одним индексом (или путем перенумерации переменных), модель задачи (22) — (28) и (30) сводим к общему виду

$$\Phi(X) = \sum_{j=1}^N C_j(X_1, X_2, \dots, X_N) X_j \rightarrow \max \quad (31)$$

при

$$A X \geq b; \quad (32)$$

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{pmatrix} \geq 0, \quad (33)$$

где

N — количество переменных величин;
 $C_j(X_1, X_2, \dots, X_N)$ — коэффициент целевой функции;
 A — матрица, соответствующая ограничениям (23) — (27);

b — вектор-столбец, компонентами которого являются свободные члены (23) — (27).

Максимизация (31) при условиях (32) — (33) является задачей нелинейного программирования с линейными ограничениями. Для решения таких задач целесообразно применение метода симплексного исправления (или квазилинеаризации). Алгоритм этого метода состоит из следующих пунктов.

1. Определяется решение $X^{(0)}$, которое обеспечивает выполнение условий (32) — (33). Для этого достаточно решить задачу (31) — (33) при условиях $C_j = \text{const}$.

2. Вычисляется градиент функции $\Phi(x)$ в точке $X = X^{(0)}$, т. е.

$$\nabla \Phi(X^{(0)}) = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial X_1}, \frac{\partial \Phi}{\partial X_2}, \dots, \frac{\partial \Phi}{\partial X_N} \right)_{X=X^{(0)}}.$$

3. Максимизируется линейный функционал

$$\sum_{j=1}^N \frac{\partial \Phi(X^{(0)})}{\partial X_j} X_j \rightarrow \max \quad (34)$$

при условиях (32) — (33).

4. Обозначив оптимальное решение задачи (32) — (34) через $\bar{X}$, на отрезке, соединяющем $X^{(0)}$ и $\bar{X}$, выбираем точку $X^{(1)}$, которая составляет максимальное значение $\Phi(X)$ на данном отрезке.

Поиск максимума $\Phi(X)$ на отрезке $(X^{(0)}, \bar{X})$ сводится к одномерной задаче: найти такое значение θ , при котором

$$\Phi[X^{(0)} + \theta(\bar{X} - X^{(0)})] \rightarrow \max$$

и

$$0 \leq \theta \leq 1.$$

5. Проверка точности полученного решения $X^{(1)}$:

$$|X_j^{(1)} - X_j^{(0)}| \leq \varepsilon, \quad (35)$$

где ε — заданная малая величина.

Если неравенство (35) соблюдается для всех $j = \overline{1, N}$, то $X^{(1)}$ является оптимальным решением задачи (31) — (33); если (35) нарушается, то $X^{(1)}$ принимается за $X^{(0)}$ и процесс повторяется с пункта 2 до получения оптимального решения.

* *

*

Развитие водного хозяйства орошаемых районов СССР в современных условиях идёт по пути создания новых и совершенствования существующих ВХС комплексного, преимущественно ирригационно-энергетического, назначения. Такие системы могут быть представлены практически бесконечным числом различных комбинаций отдельных элементов системы, уровней потребления и распределения объёма водохранилищ, предназначенных для различных целей.

Задача анализа — отыскание такой комбинации переменных, которая обеспечила бы наиболее рациональное с точки зрения народного хозяйства использование водных и гидроэнергетических ресурсов.

Появление быстродействующих ЭВМ с большим объёмом памяти делает возможным моделирование работы ВХС в течение любого периода времени и для любого уровня развития системы, что позволяет в каждом конкретном случае воспроизвести поведение системы во всех наиболее важных с точки зрения целевой задачи ситуациях и отыскать оптимальное решение.

Моделирование на ЭВМ является новым совершенным методом исследования ВХС и широкое применение его, несомненно, будет способствовать нахождению оптимальных технико-экономических решений как при проектировании, так и при эксплуатации таких систем.

ЛИТЕРАТУРА

- Абдуллаев Ф., Захидов А. З., Зияходжаев М. Оптимизация режима работы ГЭС ВХС орошаемых районов. Научно-техн. конф. по применению математических методов и ЭВМ в водохозяйственных расчетах (тезисы докладов), Ташкент, 1969.
- Аверьянов С. Ф. Расчет понижения и подъема грунтовых вод при осушении системой каналов (дрен), «Гидротехника и мелиорация», 1957, № 12.
- Аверьянов С. Ф. Горизонтальный дренаж при борьбе с засолением орошаемых земель. М., Изд-во АН СССР, 1959.
- Аверьянов С. Ф. Рассоляющее действие фильтрации из каналов, В кн. «Влияние орошения на режим грунтовых вод», М., Изд-во АН СССР, 1959.
- Айдаров И. П. Расчет дренажа и промывок засоленных земель на примере Канибадамского массива Таджикской ССР, М-во мелиорации и водного х-ва СССР, научно-техн. совет, М., 1967.
- Алексеев А. М. Значение структуры цитоплазмы для водного режима растительных клеток, В кн. «Водный режим растений и их продуктивность», М., Изд-во «Наука», 1968.
- Алексеевский Е. Е. Перспективы развития орошаемого земледелия, «Земледелие», 1964, № 3.
- Алексеевский Е. Е. Водное хозяйство СССР за 50 лет и международное сотрудничество, Бюллетень СЭВ по водному хозяйству, 1967, № 1.
- Алимов Р. А. Основные проблемы орошения и мелиорации земель и организация научных исследований, В кн. «Материалы объединенной сессии ВАСХНИЛ и АН УзССР по вопросам мелиорации», Ташкент, Изд-во «Фан» УзССР, 1967.
- Алпатов А. М. Влагооборот культурных растений, Л., Гидрометеопиздат, 1954.
- Алпатов А. М. Биоклиматический метод обоснования водного баланса растений и использование его в земледелии, В кн. «Водный режим растений в засушливых районах СССР», М., Изд-во АН СССР, 1961.
- Андрянов Б. В. Проблемы сельскохозяйственного освоения земель древнего орошения, «Вестник АН СССР», 1964, № 7.
- Андрянов Б. В., Кесь А. С. Развитие гидрографической сети и ирригации на равнинах Средней Азии, В кн. «Проблемы преобразования природы Средней Азии», М., Изд-во «Наука», 1967.
- Андрянов Б. В. Древние оросительные системы Приаралья, М., Изд-во «Наука», 1969.
- Арциховский В. М. О сосущей силе растений и методах ее изме-

- рения. В сб. «Сосущая сила древесины», М., Изд-во НКТП, 1932.
- Аскоченский А. Н. Некоторые итоги и задачи водохозяйственного проектирования и строительства, «Гидротехника и мелиорация», 1956, № 1.
- Аскоченский А. Н. Основные вопросы развития орошения и мелиорации в районах хлопкосеяния, М., Изд-во М-ва сельского х-ва СССР, 1957.
- Аскоченский А. Н. Предисловие к кн. Н. Д. Гулати «Орошение в разных странах мира», М., Сельхозгиз, 1957.
- Аскоченский А. Н. Основные направления и методы водохозяйственных работ в засушливых районах Советского Союза, В кн. «Водный режим растений в засушливых районах СССР», М., Изд-во АН СССР, 1961.
- Аскоченский А. Н. Орошение и обводнение в СССР, М., Изд-во «Колос», 1967.
- Аскоченский А. Н. Вопросы ирригации, Ташкент, Изд-во «Фан» УзССР, 1969.
- Бабаджанов С. И., Захидов А. З. К оптимизации производственной структуры сельскохозяйственных предприятий орошаемых районов при дефиците оросительной воды, Научно-техн. конф. по применению математических методов и ЭВМ в водохозяйственных расчетах (тезисы докладов), Ташкент, 1969.
- Бабинец А. Е., Звольский С. Т. Изучение режима влажности грунтов при орошении методами рассеяния нейтронов и гамма-лучей, В кн. «Влияние орошения на вторичное засоление, химический состав и режим подземных вод», М., Изд-во «Наука», 1964.
- Бабушкин Л. Н. Агроклиматическое районирование хлопковой зоны Средней Азии, М., Гидрометеониздат, 1960.
- Бабушкин Л. Н. К вопросу агроклиматического районирования республик Средней Азии, Труды Ташкентского ун-та, новая серия, вып. 186, геогр. науки, кн. 22, Ташкент, 1961.
- Бабушкин Л. Н. Принципы агроклиматического районирования Средней Азии и Южного Казахстана, Вопросы географии, сб. 55, М., Географгиз, 1961.
- Балашева Е. Н., Житомирская О. М. и Семенова О. А. Климатическое описание республик Средней Азии, Л., Гидрометеониздат, 1960.
- Большаков М. Н., Шпак В. Б. Водноэнергетические ресурсы Киргизской ССР, Фрунзе, Изд-во АН Киргиз. ССР, 1960.
- Большаков М. Н. Водные и водноэнергетические ресурсы, В кн. «Природа Киргизии», Фрунзе, Киргизгосиздат, 1962.
- Бончковский Ф. Н., Керзум П. А. Почвенно-мелиоративная характеристика земель нового освоения, В кн. «Научное совещание по комплексному использованию земельных и водных ресурсов республик Средней Азии и Южного Казахстана, Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1962.
- Бончковский Ф. Н. Основные принципы мелиорации засоленных земель на примере Вахшской долины, Всесоюзная науч.-техн. конф. по вопросам борьбы с засолением и улучшением мелиоративного состояния земель Средней Азии, Южного Казахстана и Азербайджана, Тезисы докладов, М., 1963.
- Бостонджогло А. В., Шульц В. Л., Стрижинский А. П. Исчисление выклинивающихся вод в бассейнах Юго-Западного Узбекистана, Труды «Ирригация и гидротехника», 1936, № 7.
- Бостонджогло А. А. Проблемы комплексного использования водных ресурсов реки Амударьи на генеральную перспективу, АН СССР, Ташкент, 1968.

- Браславский А. П., Викулина В. А. Нормы испарения с поверхности водохранилищ, Л., Гидрометеиздат, 1954.
- Бугаев В. А. Климат Средней Азии и Казахстана, Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1946.
- Будаговский А. И. Зависимость испарения от влажности почвы, В кн. «Суховеи, их происхождение и борьба с ними», М., Изд-во АН СССР, 1957.
- Будаговский А. И. Основные закономерности суммарного испарения, В кн. «Биологические основы орошаемого земледелия», М., Изд-во АН СССР, 1957.
- Будаговский А. И. Испарение почвенной влаги, М., Изд-во «Наука», 1964.
- Будаговский А. И. О расчете испарения с поверхности суши, «Изв. АН СССР», сер. физики атмосф. и океана, 1965, т. 1, № 4.
- Будыко М. И. Испарение в естественных условиях, Л., Гидрометеиздат, 1948.
- Будыко М. И., Юдин М. И., Яковлева Н. И. Испарение с орошаемых участков и испаряемость, «Метеорология и гидрология», 1954, № 1.
- Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности, Л., Гидрометеиздат, 1956.
- Вавилов А. П. Влияние дрен на режим грунтовых вод в зоне орошения, В кн. «Влияние орошения на вторичное засоление, химический состав и режим подземных вод», М., Изд-во «Наука», 1964.
- Вериго С. А. Динамика запасов почвенной влаги на территории СССР, Труды по сельскохозяйственной метеорологии, 1948, т. XXVI.
- Вериго С. А. и Разумова Л. А. Почвенная влага и ее значение в сельскохозяйственном производстве, Л., Гидрометеиздат, 1963.
- Вершинин П. В. и Константинова В. П. Физико-химические основы искусственной структуры почв, М. — Л., 1935.
- Водные ресурсы и водохозяйственные проблемы стран Азии, М., Изд-во «Наука», 1967.
- Водные ресурсы и их комплексное использование, М., Изд-во «Мысль», 1968.
- Водохозяйственные проблемы стран Азии, М., Изд-во «Наука», 1969.
- Волобуев В. Р. Промывки засоленных почв, Баку, 1948.
- Волобуев В. Р. О промывных нормах при мелиорации засоленных земель, «Гидротехника и мелиорация», 1959, № 2.
- Высоцкий Г. Н. Степи Европейской России, Полная энциклопедия русского сельского хозяйства, 1905, т. 9.
- Геллер С. Ю., Дунин-Барковский Л. В., Нечаева Н. Т. Вопросы преобразования природы и освоения естественных ресурсов засушливых районов, Материалы к IV съезду Географ. об-ва СССР, Л., 1964.
- Гельбух Т. М. Экспериментальное изучение испарения с водной поверхности малых водоемов, Труды ТТИ вып. 104, 1963.
- Генеральная схема комплексного использования и охраны водных ресурсов Узбекской, Киргизской, Таджикской и Туркменской ССР, первый этап, 1966—1970 гг., Ташкент, УЗИНТИ, 1965.
- Генусов А. З., Горбунов Б. В., Кимберг Н. В. Почвенно-климатическое районирование Узбекистана в сельскохозяйственных целях, Ташкент, 1960.
- Герасимов И. П. Научные проблемы преобразования природы Средней Азии для развития орошаемого земледелия и пастбищного животноводства, В кн. «Проблемы преобразования природы Средней Азии», М., Изд-во «Наука», 1967.

- Гидрологический год в бассейне Сырдарьи (1963), Сводные результаты предварительного обобщения материалов, Институт «Гидропроект», М., 1964.
- Гиршкан С. А. Задачи и пути ирригации в Средней Азии и судьба Аральского моря, «Хлопковое дело», 1929, № 11.
- Гольштейн Е. Г., Юдин Д. Б. Новые направления в линейном программировании, М., Изд-во «Советское радио», 1966.
- Горский Ю. М. О комплексном регулировании стока р. Сырдарьи и влиянии его на работу объединенной Среднеазиатской энергосистемы, В кн. «Научное совещание по комплексному использованию земельных и водных ресурсов республик Средней Азии и Южного Казахстана», Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1962.
- Грабовская О. А. Опыт мелиоративного освоения засоленных и заболоченных земель в Вахшской долине в условиях средней точности грунтовых вод, В кн. «Мелиорация почв Вахшской долины», Душанбе 1957.
- Грин А. М. Изменения динамики стока реки Сырдарьи в связи с развитием орошения в Ферганской долине, «Изв. АН СССР», серия геогр., 1959, № 3.
- Гулати Н. Д. Орошение в разных странах мира, М., Сельхозгиз, 1957.
- Гулямов Я. Г. Археологические работы к западу от Бухарского оазиса, Труды Ин-та истории и археологии, вып. 8, Ташкент, Изд-во АН СССР, 1956.
- Гулямов Я. Г. История орошения Хорезма с древнейших времен до наших дней, Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1957.
- Дерягин Б. В., Мельникова М. К. Экспериментальное исследование передвижения воды в почве под влиянием градиентов концентрации растворимых веществ, температуры и влажности, Доклад VI междунар. конгр. почвовед., Физика почв, М., Изд-во АН УзССР, 1956.
- Дмитриев С. И. Закономерности испарения влаги почвой при различной влажности ее поверхности, Труды ЛГМИ, вып. 16, 1964.
- Дмитриевский Ю. Д. Внутренние воды Африки и их использование, Л., Гидрометеиздат, 1967.
- Докучаев В. В. Учение о зонах природы, М., Изд-во АН СССР, 1948.
- Долгов С. И. Исследование подвижности почвенной влаги и ее доступность для растений, М.—Л., Изд-во АН СССР, 1948.
- Дренаж сельскохозяйственных земель, пер. с англ., М., Изд-во «Колос», 1964.
- Друэн Ж. Проблемы водных ресурсов в Северо-Западной Африке, В кн. «Гидрогеология и гидрология аридной зоны земного шара», М., ИЛ, 1955.
- Дунин-Барковский Л. В. Развитие орошения в Узбекистане водами Амударьи, Ташкент, 1946.
- Дунин-Барковский Л. В. О водном балансе орошаемой территории, «Изв. АН СССР», сер. геогр. 1956, № 5.
- Дунин-Барковский Л. В. Проблемы ирригации и мелиорации орошаемых земель в странах Ближнего и Среднего Востока, «Гидротехника и мелиорация», 1956, № 7.
- Дунин-Барковский Л. В. Физико-географические основы проектирования оросительных систем (районирование и водный баланс орошаемой территории), М., Изд-во М-ва водного х-ва СССР, 1960.
- Дунин-Барковский Л. В. Развитие ирригации и судьба Аральского моря, В кн. «Проблемы преобразования природы Средней Азии», М., Изд-во «Наука», 1967.
- Дунин-Барковский Л. В. Применение математических методов и средств вычислительной техники в ирригации, В кн. «Материалы

- лы объединенной сессии ВАСХНИЛ и АН УзССР по вопросам мелиорации», Ташкент, Изд-во «Фан» УзССР, 1967.
- Дуниин-Барковский Л. В. Роль математических методов и средств вычислительной техники в мелиорации и водном хозяйстве, В кн. «Оптимальные методы орошения (материалы совещания в г. Новосибирске в марте 1967 г.)», М., 1968.
- Егоров В. В. Засоленные почвы и их освоение, М., Изд-во АН СССР, 1954.
- Егоров В. В. Почвообразование и условия проведения оросительных мелиораций в дельтах Арало-Каспийской низменности, М., Изд-во АН СССР, 1959.
- Зайков Б. Д. Испарение с водной поверхности прудов и малых водохранилищ на территории СССР, Труды ГГИ, вып. 21 (75), 1949.
- Захаров В. П. Водный бассейн как единая водохозяйственная система, «Изв. УзФАН СССР», 1940, № 9.
- Захаров В. П. Комплексное регулирование стока рек Узбекистана, «Изв. УзФАН СССР», 1940, № 10.
- Захидов А. З. Насосно-аккумулирующие гидроэлектростанции с сезонным циклом регулирования, Труды Ин-та энергетики АН УзССР, вып. 9, 1956.
- Захидов А. З. Насосное гидроаккумулирование в условиях орошаемых районов, В кн. «Высокоманевренные электростанции и насосное аккумулирование», АН СССР, Энергетический ин-т им. Г. М. Кржижановского, М., 1959.
- Захидов А. З. Насосно-аккумулирующие электростанции сезонного цикла, Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1959.
- Захидов А. З., Чернова А. Ф. Гидроэнергетические ресурсы рек Ферганской долины, ДАН УзССР, 1961, № 12.
- Захидов А. З. Гидроэлектрические станции (на узб. языке), Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1961.
- Захидов А. З. Об энергетической эффективности Чарвакской ГЭС, В сб. «Вопросы гидротехники», вып. 6, Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1962.
- Захидов А. З. Гидроэнергетические ресурсы рек Узбекской ССР и сопредельных районов, ДАН УзССР, 1962, № 8.
- Захидов А. З. Насущные задачи комплексного использования водных ресурсов Средней Азии, «Изв. АН УзССР», сер. техн. наук, 1962, № 5.
- Захидов А. З., Бенъяминович Э. М., Озерский Е. И. Технико-экономические показатели орошения и освоения Голодной степи, Женева, Изд-во ООН, 1962.
- Захидов А. З., Чернова А. Ф. Водноэнергетические ресурсы рек Узбекской ССР, Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1963.
- Захидов А. З., Полинов С. А. К проблеме покрытия пиковой нагрузки единой энергетической системы Средней Азии, «Изв. АН УзССР», сер. техн. наук, 1963, № 4.
- Захидов А. З. Ирригационно-энергетическое регулирование стока рек, Труды конф. Румынского научн.-исслед. ин-та гидротехники, Бухарест, 1964.
- Захидов А. З. Водохозяйственное строительство и опыт орошения и освоения крупных массивов земель, В трудах 17 Всепакистанского научного конгресса (на англ. языке), Карачи, 1965.
- Захидов А. З., Светицкий В. П. Водохозяйственный баланс орошаемой территории (на примере Средней Азии), Труды САНИИРИ, вып. 111, Ташкент, 1966.
- Захидов А. З., Наджимов Ф. И. Достижения гидротехнической и гидромелиоративной науки в Узбекистане, «Изв. АН УзССР», сер. техн. наук, 1967, № 5.

- Захидов А. З. Расчет оросительной способности рек на цифровых вычислительных машинах. Бюллетень научно-технической информации САНИИРИ, № 6, Ташкент, 1968.
- Захидов А. З. Оптимизация использования водных ресурсов Сырдарьи путем применения математико-экономических методов исследования. Тезисы докладов и сообщений на II межвузовской конференции по экономической эффективности капиталовложений и финансированию ирригации и мелиорации, Ташкент, 1969.
- Захидов А. З., Машарипов Р. Методы расчета на ЭВМ потенциальной оросительной способности рек, «Изв. АН УзССР», сер. техн. наук, 1969, № 4.
- Захидов А. З. Применение ЭВМ в водохозяйственных расчетах, Науч.-техн. конф. по применению математ. методов и ЭВМ в водохозяйственных расчетах (тезисы докладов), Ташкент, 1969.
- Захидов А. З. Моделирование на ЭВМ водохозяйственных систем орошаемых районов. Науч.-техн. конф. по применению математ. методов и ЭВМ в водохозяйственных расчетах (тезисы докладов), Ташкент, 1969.
- Захидов А. З., Машарипов Р. К методике расчета на ЭВМ потенциальной оросительной способности ВХС. Науч.-техн. конф. по применению математ. методов и ЭВМ в водохозяйственных расчетах (тезисы докладов), Ташкент, 1969.
- Захидов А. З., Зияходжаев М., Усманова М. К вопросу расчета режима работы ВХС на ЭВМ. Научно-техн. конф. по применению математ. методов и ЭВМ в водохозяйственных расчетах (тезисы докладов), Ташкент, 1969.
- Значение дренажа в повышении плодородия почв, М., Изд-во АН СССР, 1956.
- Зуев М. В. Формирование микроклимата хлопкового поля, М., Гидрометеониздат, 1956.
- Ибрагимов Г. А. Влияние полива минерализованными водами на почву и на урожай хлопчатника. В кн. «Влияние орошения на вторичное засоление, химический состав и режим подземных вод», М., Изд-во «Наука», 1964.
- Иванов Н. Н. Зоны увлажнения земного шара, «Изв. АН СССР», сер. геогр. и геофиз., 1941, № 3.
- Иванов Н. Н. Ландшафтно-климатические зоны земного шара, Зап. геогр. о-ва, т. 1, новая серия, М.—Л., Изд-во АН СССР, 1948.
- Иванов Н. Н. Об определении величины испаряемости, «Изв. Всесоюз. геогр. о-ва», 1954, т. 86, № 2.
- Иванов Н. Н. Атмосферное увлажнение тропических и сопредельных стран земного шара, М.—Л., Изд-во АН СССР, 1958.
- Израэльсон О. У. Научные основы и практика орошения (пер. с англ.) М., ИЛ, 1936.
- Израэльсон О. У. Теория и практика ирригации, М., ИЛ, 1956.
- Ильин И. А. Водные ресурсы Ферганской долины (гидрологический очерк), Л., Гидрометеониздат, 1959.
- Ильясов А. Т. Формирование стока рек в горной части Средней Азии и роль снеговых, ледниковых и грунтовых вод в этом процессе, Труды III Всесоюз. гидрол. съезда, т. 2, Л., Гидрометеониздат, 1959.
- Калачев Н. С., Майзель Я. М., Резняков А. Б., Чоккин Ш. Ч. Энергетика Казахстана, Алма-Ата, 1958.
- Кац Д. М. Режим грунтовых вод в орошаемых районах и его регулирование, М., Сельхозгиз, 1963.
- Кенесарин Н. А., Ходжибаев Н. Н. Основные проблемы мелиоративной гидрогеологии в районах орошаемого земледелия СССР, В кн. «Гидрогеология аридных зон», М., Изд-во «Недра», 1964.

- Кеммерих А. О. Подземные воды в пустынях Средней Азии, «Природа», 1961, № 12.
- Керзум П. А. О действии коллекторно-дренажной сети в Вахшской долине, В кн. «Применение дренажа при освоении засоленных земель, М., Изд-во АН СССР, 1958.
- Ковда В. А. Происхождение и режим засоленных почв, т. I, М.—Л., Изд-во АН СССР, 1946.
- Ковда В. А. Происхождение и режим засоленных почв, т. II, М.—Л., Изд-во АН СССР, 1947.
- Ковда В. А. Почвенно-мелиоративные основы борьбы с засолением почв в орошаемом земледелии, Труды Моск. гидромелиор. ин-та, т. XIII, вып. 33, 1947.
- Ковда В. А. Повышение плодородия и мелиорация почв в орошаемых районах, «Почвоведение», 1954, № 7.
- Ковда В. А., Легостаев В. М., Морозов А. Т. и др. Значение дренажа в повышении плодородия почв, М., 1956.
- Ковда В. А. Дренаж в борьбе с засолением орошаемых почв, В кн. «Применение дренажа при освоении засоленных земель», Изд-во АН СССР, М., 1958.
- Ковда В. А., Егоров В. В. Почвенно-мелиоративные предпосылки применения дренажа для борьбы с засолением орошаемых земель, В кн. «Применение дренажа при освоении засоленных земель, М., Изд-во АН СССР, 1958.
- Ковда В. А. Уроки и опыт оросительных мелиораций, В кн. «Материалы объединенной сессии ВАСХНИЛ и АН УзССР по вопросам мелиорации», Ташкент, Изд-во «Фан» УзССР, 1967.
- Колясов Ф. Е. Подвижность воды в почве и некоторые пути ее регулирования, В кн. «Вопросы агрономической физики», Л., 1957.
- Константинов А. Р. О режиме испарения и транспирации с сельскохозяйственных угодий, Вестник с.-х. науки, 1962, № 2.
- Константинов А. Р. Испарение в природе, Л., Гидрометеониздат, 1968.
- Коньков Б. С. Агротехнические меры борьбы с засолением почв, Ташкент, Госиздат УзССР, 1948.
- Коржавин Б. Д. Перспективы развития орошения в Средней Азии и Южном Казахстане, В кн. «Научное совещание по комплексному использованию земельных и водных ресурсов республик Средней Азии и Южного Казахстана», Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1962.
- Корнаков Г. И., Бостонджогло А. А., Бахтияров Р. И. О генеральной схеме комплексного использования водных ресурсов реки Амударьи, Ташкент, 1968.
- Костяков А. Н., Фаворин И. Н., Аверьянов С. Ф. Влияние орошения на режим грунтовых вод, вып. I, М., Изд-во АН СССР, 1956.
- Костяков А. Н., Фаворин И. Н., Аверьянов С. Ф. Влияние орошения на режим грунтовых вод, вып. II, М., Изд-во АН СССР, 1959.
- Костяков А. Н. Основы мелиорации, М., Сельхозгиз, 1960.
- Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Гидрологические основы речной гидротехники, М., Изд-во АН СССР, 1950.
- Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Водохозяйственные расчеты, Л., Гидрометеониздат, 1952.
- Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. О водохозяйственном балансе бассейна Сырдарьи, Научное совещание по комплексному использованию земельных и водных ресурсов республик Средней Азии и Южного Казахстана, Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1962.
- Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. О генеральной схеме комплексного использования и охраны водных ресурсов СССР, Труды Гидропроекта, М.—Л., Изд-во «Энергия», 1964.

- Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Методические основы построения водохозяйственных балансов, Труды Гидропроекта, М.—Л., Изд-во «Энергия», 1964.
- Кузин П. С. График испарения с поверхности речного бассейна и его применение к расчету среднего многолетнего стока, Зап. ГГИ, т. XII, 1934.
- Кузин П. С. Об испарении с поверхности почвы, Труды ГГИ, вып. 7, 1938.
- Кузин П. С. Испарение с суши на территории СССР, Труды ГГИ, вып. 26 (80), 1950.
- Латынин Б. А. Вопросы истории ирригации и орошаемого земледелия древней Ферганы. Обобщающий доклад по работам, представленным как диссертация на соискание ученой степени доктора исторических наук, Л., 1962.
- Легостаев В. М. Промывные поливы засоленных почв, М., Сельхозгиз, 1953.
- Легостаев В. М., Коньков Б. К. Мелиоративное районирование Средней Азии, Ташкент, 1953.
- Легостаев В. М. Дополнительные источники орошения Средней Азии и Южного Казахстана, В кн. «Вопросы использования водных ресурсов Средней Азии», М., Изд-во АН СССР, 1954.
- Легостаев В. М. Ирригационно-мелиоративные мероприятия за рубежом (Египет, Индия, США), Ташкент, 1957.
- Легостаев В. М. Мелиорация засоленных земель, Ташкент, Госиздат УзССР, 1959.
- Легостаев В. М. Об использовании вод повышенной минерализации на орошение, Ташкент, Госиздат УзССР, 1961.
- Легостаев В. М. Развитие ирригационно-мелиоративных работ и исследований в Узбекистане, В кн. «Достижения науки по хлопководству», Ташкент, Изд-во «Фан» УзССР, 1968.
- Летунов П. А. Земельные фонды и проблема сельскохозяйственного освоения новых орошаемых земель в республиках Средней Азии и Южного Казахстана, В кн. «Научное совещание по комплексному использованию земельных и водных ресурсов республик Средней Азии и Южного Казахстана», Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1962.
- Летунов П. А., Земский Г. И., Миркин С. Л. Ирригационно-мелиоративная оценка земельных фондов в бассейнах рек Амударьи и Сырдарьи, Труды Арало-Каспийской комплексной экспедиции, Вып. 1, М., Изд-во АН СССР, 1954.
- Лисицына Г. Н. Орошаемое земледелие эпохи энеолита на юге Туркмении, М., Изд-во «Наука», 1965.
- Лисицына Г. Н., Маэсон В. М., Сарганиди В. И., Хлопин И. Н. Итоги археологического и палеогеографического изучения Геоксюрского оазиса (1956—1962 гг.), «Советская археология», 1965, № 1.
- Лобанов Н. В. Критическая для высших растений почвенная влажность, сообщ. 1, Научно-агроном. журн., 1925, № 4.
- Лобанов Н. В. Критическая для высших растений почвенная влажность, сообщ. 2, Научно-агроном. журн., 1926, № 10.
- Луценко И. М. К вопросу о методике исчисления добавочных вод в оазисах Средней Азии, Труды и материалы по гидрологии Средней Азии, вып. 1, Самарканд—Ташкент, Изд-во УЕГМС Средней Азии, 1935.
- Маас А., Хафшмидт М. М., Дорфман Р., Марглин С. А., Файер Г. М. Проектирование комплексного использования водных ресурсов, пер. с англ. под ред. Г. Л. Золотарева и В. И. Обрезкова, М.—Л., Изд-во «Энергия», 1966.

- Макеев П. С. К вопросу о физико-географическом районировании Средней Азии, В кн. «Вопросы географии», Сб. 39, М., Изд-во «География», 1956.
- Мамедов А. Русские ученые и развитие ирригации Средней Азии, Ташкент, Изд-во «Узбекистан», 1965.
- Мамедов А. Развитие ирригации в Узбекистане, Ташкент, Изд-во «Фан» УзССР, 1967.
- Малыгин В. С. Глубокий закрытый дренаж. СоюзНИИИ, Ташкент, 1939.
- Масальский В. И. Туркестанский край. Россия, Полное географическое описание, т. 19, Спб., 1913.
- Маслов Б. С., Нестеров Е. А. Вопросы орошения и осушения в США, М., Изд-во «Колос», 1967.
- Массон В. М. Древнеземледельческая культура Марганы. Изд-во АН СССР, М.—Л., 1959.
- Массон В. М. Средняя Азия и Древний Восток, М.—Л., Изд-во «Наука», 1964.
- Мейджс П. Распределение на земном шаре аридных и полуаридных гомоклиматов, В кн. «Гидрогеология и гидрология аридной зоны земного шара», М., ИЛ, 1955.
- Мечитов И. И. Основы составления водохозяйственных балансов и оптимизации распределения водных ресурсов (в районах с широким развитием орошения), Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора техн. наук, М., 1968.
- Миддендорф А. Ф. Очерки Ферганской долины, Спб., 1882.
- Минашина Н. Г., Шувалов С. А. Пути использования земельных ресурсов Средней Азии под дальнейшее орошение и борьба с вторичным засолением, В кн. «Проблемы преобразования природы Средней Азии», М., Изд-во «Наука», 1967.
- Миркин С. Л. Коэффициент полезного действия оросительных систем Средней Азии и пути его повышения, В кн. «Вопросы использования водных ресурсов Средней Азии», М., Изд-во АН СССР, 1954.
- Миркин С. Л. Оросительные системы нижней дельты Амударьи и пути их реконструкции, В кн. «Вопросы орошения в низовьях Амударьи», М., Изд-во АН СССР, 1966.
- Миркин С. Л. Мелноративные условия развития орошения в нижней дельте Амударьи, В кн. «Вопросы сельскохозяйственного освоения низовьев Амударьи», М., Изд-во АН СССР, 1957.
- Миркин С. Л. Возможности развития орошения на основе улучшения ирригационных систем, Материалы объедин. науч. сессии по хлопководству, т. III, Ташкент, УчГИЗ, 1958.
- Миркин С. Л. Водные мелнорации в СССР и пути их развития, М., Изд-во АН СССР, 1960.
- Молчанов Л. А. К вопросу о климатическом районировании хлопкового района, «Хлопковое дело», 1925, № 5—6.
- Молчанов Л. А. Климат Узбекистана, В кн. «Узбекистан. Труды и материалы первой конференции по изучению производительных сил Узбекистана, 19—28 декабря 1932», т. 3, Л., Изд-во АН СССР, 1934.
- Морозов А. Т. Закономерности передвижения растворов в почвах и грунтовых водах, Труды восьмой объедин. сессии АН Туркменской ССР, 1956.
- Муминов Ф. А. Испарение с хлопкового поля и его связь с метеорологическими элементами, Труды САНИГМИ, вып. 14 (29), 1964.
- Нерпи С. В., Мельникова М. И. Равновесие и движение влаги в почвах и грунтах, В кн. «Вопросы агрономической физики», Л., 1957.

- Нерпин С. В. Водоудерживающая способность структурных почв и их влагопроводность, Труды по агрономической физике, вып. 10, М.—Л., 1962.
- Озерский Е. И. Ирригация США, Ташкент, Изд-во «Узбекистан», 1965.
- Олейник Р. Н. Режим испарения с озимой пшеницы на территории Украины, Труды УкрНИГМИ, вып. 44, 1964.
- Ольдекоп Э. М. Об испарении с поверхности речных бассейнов, Труды Юрьевской обсерватории, 1911.
- Орошаемое земледелие, под ред. С. Н. Рыжова и Ф. Сукача, Ташкент, Изд-во «Узбекистан», 1965.
- Поляков Б. Д. Изменение влажности почв и прогноз их просыхания, Труды ЦИП, вып. 4 (31), 1947.
- Проблемы ирригации республик Средней Азии, Сборник под ред. Л. А. Авербуха, Изд. Средазгосплана, Ташкент, 1934.
- Пославский В. В. Борьба с потерями воды из оросительных каналов за рубежом и в СССР, Гипроводхоз, М., 1957.
- Рабочев И. С. Засоленные почвы и их мелиорация, В кн. «Хлопководство Туркменистана», Ашхабад, Туркмениздат, 1952.
- Рабочев И. С. Мелиорация засоленных почв среднего течения Амударьи, Ашхабад, Туркмениздат, 1964.
- Рабочев И. С. Регулирование солевого режима почв и грунтов в условиях орошаемого земледелия, В кн. «Проблемы преобразования природы Средней Азии», М., Изд-во «Наука», 1967.
- Рабочев И. С. О достижениях и задачах науки в области мелиорации засоленных почв, В кн. «Материалы объединенной сессии ВАСХНИЛ и АН УзССР по вопросам мелиорации, Ташкент, Изд-во «Фан» УзССР, 1967.
- Разумова Л. А. Изменение запасов почвенной влаги в зимний период, «Метеорология и гидрология», 1950, № 1.
- Разумова Л. А. Особенности засухи в острозасушливых районах СССР и учет климатических ресурсов при разработке приемов земледелия, В сб. «Вопросы земледелия и борьба с эрозией почв в степных и лесостепных районах СССР», т. II, Саратовское книжное изд-во, 1959.
- Растение и вода, пер. с англ., Л., Гидрометеиздат, 1967.
- Рачинский А. А. Возможность использования грунтовых вод для промывок и вегетационных поливов, В сб. «Вопросы гидротехники», вып. 29, Ташкент, Изд-во «Фан» УзССР, 1965.
- Рачинский А. А., Решеткина Н. М. Проблемы развития и организация научно-исследовательских работ в области мелиорации земель, В сб. «Вопросы гидротехники», вып. 29, Ташкент, Изд-во «Фан» УзССР, 1965.
- Решеткина Н. М. Регулирование и использование грунтовых вод долины реки Зарафшан, «Изв. АН УзССР», 1952, № 5.
- Решеткина Н. М. Гидрогеологические основы проектирования вертикального дренажа в Голодной степи, Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1960.
- Решеткина Н. М., Барон В. А., Якубов Х. Вертикальный дренаж орошаемых земель, М., Изд-во «Колос», 1966.
- Роде А. А. Почвенная влага, М., Изд-во АН СССР, 1952.
- Роде А. А. Методы изучения водного режима почв, М., Изд-во АН СССР, 1960.
- Розанов А. Н. Засоление и мелиорация орошаемых почв, В кн. «Применение дренажа при освоении засоленных земель», М., Изд-во АН СССР, 1958.
- Розов Л. Л. Мелиоративное почвоведение, М., Сельхозгиз, 1936.

- Рыжов С. Н. Орошение хлопчатника в Ферганской долине, Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1948.
- Рыжов С. Н. О способах определения сроков полива хлопчатника, Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1953.
- Рыжов С. Н. Принципиальные основы орошения хлопчатника, В кн. «Влияние орошения на вторичное засоление, химический состав и режим подземных вод», М., Изд-во «Наука», 1964.
- Рыжов С. Н. Потребность различных культур в орошении, В кн. «Почва аридной зоны как объект орошения», М., Изд-во «Наука», 1968.
- Сабинина И. Г. К вопросу оценки условий расходования влаги хлопчатником в вегетационный период в условиях орошаемого земледелия Узбекистана, Труды САНИГМИ, вып. 24 (39), 1965.
- Савина С. С. Дефицит испарения как показатель засухи, В сб. «Гидроклиматический режим лесостепной и степной зон СССР в засушливые и влажные годы», М., Изд-во АН СССР, 1960.
- Светицкий В. П. Возвратные воды в верховьях р. Амударьи, Труды САНИИРИ, вып. 113, Ташкент, 1967.
- Селянинов Г. Т. К методике сельскохозяйственной климатологии, Труды по с.-х. метеорологии, вып. 22, Л., 1930, № 2.
- Селянинов Г. Т. Методика сельскохозяйственной характеристики климата, Мировой агроклиматический справочник, М., Гидрометеиздат, 1937.
- Селянинов Г. Т. Климатическое районирование СССР для сельскохозяйственных целей, В кн. «Памяти акад. Л. С. Берга», М.—Л., Изд-во АН СССР, 1955.
- Скворцов А. А. К вопросу о климате оазиса и пустыни и некоторые особенности их теплового баланса, Труды по с.-х. метеорологии, вып. XV, 1928.
- СОПС при Госплане СССР, Комплексное использование водных ресурсов СССР, (1966—1970), М., 1965.
- Соседко А. Ф. Мелиорация Хорезмской области, В кн. «Всесоюзная науч.-техн. конф. по вопросам борьбы с засолением и улучшения мелиоративного состояния орошаемых земель Средней Азии, Южного Казахстана и Азербайджана, М., 1963.
- Средняя Азия. АН СССР, Институт географии, М., Изд-во «Наука», 1968.
- Строганов Б. П. Физиологические основы солеустойчивости растений, М., Изд-во АН СССР, 1962.
- Султанходжаев А. М., Дусходжаев Х., Хусанова Л. Об основном очаге разгрузки подземных вод Сырдарьинского артезианского бассейна, ДАН УзССР, 1962, № 9.
- Технические указания по проектированию горизонтального дренажа засоленных земель, Гипроводхоз, М., 1965.
- Толстов С. П. О землях древнего орошения в низовьях Амударьи и Сырдарьи и возможности их освоения в современных условиях, «Общественные науки в Узбекистане», 1961, № 8.
- Толстов С. П. По древним дельтам Окса и Яксарта, М., Изд-во вост. лит., 1962.
- Толстов С. П., Андрианов Б. Н. Новые материалы по истории развития ирригации в Хорезме. Краткие сообщения Ин-та этнографии, вып. 26, М., Изд-во АН СССР, 1967.
- Федосеев А. П. Поверхностный слой почвы и испарение влаги, «Метеорология и гидрология», 1941, № 5.
- Харченко К. И. Гидрология орошаемых земель, Л., Гидрометеиздат, 1968.
- Хлопководство Узбекистана за 50 лет. Справочник, Ташкент, Изд-во «Узбекистан», 1967.
- Хлопчатник. Том II, Климат и почвы хлопковых районов Средней Азии, Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1957.

- Хорафас Д. Н. Системы и моделирование, М., Изд-во «Мир», 1967.
- Цейтин Г. Х. О вычислении коэффициента температуропроводности и потока тепла в почву по осредненным температурам, Труды ГГИ, вып. 60, 1956.
- Чаплыгин А. В. Вопросы межбассейновых водохозяйственных связей, М., Изд-во АН СССР, 1956.
- Чаркин А. Ф. Шерстюк А. Н. К методике изучения режима влажности грунта в зоне аэрации, В кн. «Влияние орошения на вторичное засоление, химический состав и режим подземных вод», М., Изд-во «Наука», 1964.
- Черкасов А. А. Мелиорация и водохозяйственное водоснабжение, М., Сельхозгиз, 1950.
- Чуприн И. А., Бобков В. П., Лобов Н. Ф., Минкин В. И., Штокалов Д. А. Справочник гидротехника, М., Изд-во «Колос», 1967.
- Шардаков В. С. Водный режим хлопчатника и определение оптимальных сроков полива, Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1953.
- Шаров И. А. Эксплуатация гидромелиоративных систем, М., Изд-во «Колос», 1968.
- Шаумян В. А. Научные основы орошения и оросительных сооружений, М., Сельхозгиз, 1948.
- Шахов А. А. Солеустойчивость растений, М., Изд-во АН СССР, 1956.
- Шашко Д. И. Агроклиматическое районирование СССР по обеспеченности растений теплом и влагой, В кн. «Вопросы агроклиматического районирования СССР», М., Изд-во М-ва сельского х-ва СССР, 1958.
- Шишкин В. А. Варахша, М., Изд-во «Наука», 1963.
- Шошин А. А. Дифференцированные нормы промывных поливов на мелиорированных засоленных землях низменностей Азербайджана. Бюлл. научн.-техн. информации, № 1, АзНИГИМ, Баку, 1956.
- Шредер В. Р. О поливной норме, «Хлопководство», 1963, № 2.
- Шубладзе К. Н. Из водохозяйственной практики за рубежом, «Гидротехника и мелиорация», 1955, № 6.
- Шульц В. Л. Гидрография Средней Азии. Краткий очерк, Изд-во САГУ, Ташкент, 1958.
- Шульц В. Л., Орешина Л. М. Водный баланс Ферганской долины, «Изв. АН УзССР», сер. техн. наук, 1959, № 4.
- Шульц В. Л., Ахмедов Г. А., Орешина Л. М., Рубинова Ф. Э. К вопросу изменения стока р. Сырдарьи в районе Чардаринского водохранилища в связи с развитием орошения, «Изв. АН УзССР», сер. техн. наук, 1961, № 2.
- Шульц В. Л. Водные ресурсы Средней Азии, их изученность и некоторые вопросы изменения их режима в связи с гидротехническим строительством, В кн. «Научное совещание по комплексному использованию земельных и водных ресурсов республик Средней Азии и Южного Казахстана», Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1962.
- Шульц В. Л. Реки Средней Азии, Л., Гидрометеониздат, 1965.
- Шульц В. Л. Изученность водных ресурсов Средней Азии и пути их использования, В кн. «Проблемы преобразования природы Средней Азии», М., Изд-во «Наука», 1967.
- Эль Габали М. М. Вторичное засоление почв Египта под влиянием оросительных и подземных вод, В кн. «Влияние орошения на вторичное засоление, химический состав и режим грунтовых вод», М., Изд-во «Наука», 1964.
- Янишевский Н. А. Водные и земельные ресурсы и оросительная способность источников орошения Средней Азии, Ташкент, Изд-во Среднеазиатского Госплана, 1931.

- Albrecht F. Über die Wärme- und Wasserbilanz der Erde, *Ann. der Meteor.* Hft. 5/6, 1949.
- Albrecht F. Die Methoden zur Bestimmung der Verdunstung der natürlichen Erdoberfläche, *Archiv. Meteor. Geophys.*, 4, Bioklim. Bd 2, 1950.
- Blaney H. F., Criddle W. D. Determining water requirements in irrigated areas from climatologic and irrigation data, U. S. Soil Cons. Serv. Techn. Publ., 1950, 96.
- Donnan W. W., Bradshaw G. B., Blaney H. F. Drainage investigation in Imperial Valley California 1941—51, U.S.D.A. Soil. Cons. Serv. Tech. Pub., 1954, 120.
- Cekera F. Die Nutzbarkeit des Bodenwassers für die Pflanze, *Z. Pflanzenernähr., Düng und Bodenkunde*, Teil A, Bd 26, Hft. 1/2, 1932.
- Israelsen O. W. *Irrigation Principles and Practices*, New York, 1950.
- Israelsen O. W., Peterson D. F. Jr., Reeve R. C. Effectiveness of gravity drains and experimental pumping for drainage. Delta Area, Utah, Utah Agr. Exp. Sta. Bul., 1950, 345.
- Lang R. *Verwitterung und Bodenbildung als Einführung in Bodenkunde*. Stuttgart, 1920.
- Martonn E. *Areisme et indice daridite*, C. R. Acad. Sci., vol. 182, 1926.
- Mayer A. *The Elements of Hydrology*, N. Y., 1926.
- McCulloch A. W. and Schunk I. F. *Sprinker irrigation*, Washington, 1955.
- Morrice H. A. W. and Allan W. N. Planning for the ultimate hydraulic development of the Nile Valley, *Proc. Inst. Civil Eng.*, 1959, 14, 101.
- Murphy D. W. Drainage of Shoshone irrigation project, *Eng. Rec.*, 1914, 69.
- Nielsen D. R., Biggar I. W., Luthin J. N. Desalinization of soils under controlled unsaturated flow conditions, International commission of Irrigation and Drainage. 6-th Congress, New Delhi, 1966.
- Penck A. Versuch einer Klimaklassifikation auf Physiogeographische Grundlage Sitzberpreuss. Acad. Wiss. Phys. Math. Kl., Nr. 12, 1910.
- Penman H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc.*, vol. 193A, No. 1032, 1948.
- Penman H. L. *Evaporation: an introductory survey*, Netherlands J. Agric. Sci., vol. 4, No. 1, 1956.
- Prescott I. A. *The Soil of Australia in Relation to Vegetation and Climate*, Council for Scientific and Industrial Research, Australia, Bull. 52, 1931.
- Reeve R. C. The relation of salinity to irrigation and drainage requirements, Third Congress International Commission of Irrigation and drainage, question 10, 1957, p. 10, 175, 187.
- Stern J. *Der Anglo-Aegyptischen Sudan (eine wirtschaftsgeographische Betrachtung)*, Glessen, 1928.
- Transeau E. N. Forest Centres of Eastern America, *Am. Naturalist*, 39, No. 468, 1905.
- Zakhidov A., Benyaminovich E., Ozersky E. Technical and economic aspects of irrigation and drainage of Golodnaya steppe, United nations conference on the application of science and technology for the benefit of the less developed areas (UNCSAT), Geneva, Dec. 1962, Summary.
- Zakhidov A., Benyaminovich E., Ozersky E. Technical and economic aspects of irrigation and drainage of Golodnaya Steppe, UNCSAT, Geneva, Jan. 1963.

- Zakhidov A., Benyaminovitch E., Ozersky E. Indices technico-economiques de l'irrigation et la mise en valeur de la Steppe de la faim, UNCSAT, Geneve, Feb. 1963.
- Sajudov A., Benyaminovich E., Ozersky E. Indices tecnico-economicos de la irrigacion y asimilacion de la estepa esteril. UNCSAT, Geneve, Jan. 1963.
- Zakhidov A. Water constructional works and experience in reclaiming vast areas of lands in Central Asia, Seventeenth all Pakistan science conference, West Pakistan, Karachi, 12—17 Feb., 1965.
-

Дата выпадения осадков		Количество осадков x		Расход осадков		Общее количество воды в метровом слое почвы после осадков W_K , $м^3/га$	Расход почвенной влаги на испарение E , $м^3/га$	Общее количество воды в метровом слое почвы до очередных осадков W_{II} , $м^3/га$
месяц	число	мм	$м^3/га$	на ΔW , $м^3/га$	на Φ , $м^3/га$			
Данные метеостанции „Ташкент“, 1939—1940 гг.; НВ=2800 $м^3/га$								
X	13, 14, 17, 18, 19, 21, 24—28	27,6	276	276	0	2236	276	1960
XI	2—5, 7—10, 11, 12, 15, 19—20, 23, 24	50,8	508	508	0	2468	200	2268
XII	1, 4—6, 8—11, 14—16, 18—20, 26	53,5	535	535	3	2800	230	2570
I	3, 6—8, 10—12, 15—19, 25, 27, 29—31	48,1	481	230	251	2800	150	2650
II	2—15, 19—20, 23, 28—29	52,6	526	150	376	2800	140	2660
III	3, 7, 8, 13, 24—27	52,1	521	140	381	2800	280	2520
			2847		1011		1276	2520—1960=560

Данные метеостанции „Ташкент“, 1952—1953 гг.

X	0	0	0	0				1960
XI	7—10, 14—17, 20, 22—24, 30—31	47,3	47,3	47,3	0	2433	90	2343
XII	1—10, 11—12, 15—17, 19—21, 23, 25, 30	31,5	315	315	0	2658	102	2556
I	7—9, 11, 14, 19, 21—22, 24—26	55,4	554	244	310	2800	110	2690
II	1, 2, 8, 9, 13—15, 20—22	26,9	269	110	159	2800	160	2640
		31,6	316	160	156	2800	140	2660
	25, 26	13,5	135	135	0	2795	100	2695
III	1—11	93,8	938	105	833	2800	30	2770
	14—15	10,3	103	30	73	2800	30	2770
	18—19	4,3	43	30	13	2800	15	2785
	21—23	24,4	244	15	229	2800	15	2785
	25—28	11,1	111	15	96	2800	60	2740
			3501		1869		852	2740—1960=780

Данные метеостанции „Ташкент“, 1968—1969 гг.

X	27, 28	27,6	276	276	0	2236	276	1960
XI	9—10, 13, 15, 17—22, 30	1,9	19	19	0	1979	19	1960
		49,5	495	495	0	2455	30	2425
		8,5	85	85	0	2510	0	2510
XII	1—7, 14—18	53,7	537	290	247	2800	35	2765
		45,3	453	35	418	2800	60	2740

Дата выпадения осадков		Количество осадков x		Расход осадков		Общее количество воды в метровом слое почвы после осадков W_k , $m^3/га$	Расход почвенной влаги на испарение E , $m^3/га$	Общее количество воды в метровом слое почвы до очередных осадков W_n , $m^3/га$
месяц	число	мм	$m^3/га$	на ΔW , $m^3/га$	на Φ , $m^3/га$			

Данные метеостанции „Ташкент“, 1968—1969 гг.

I	2—10	35,8	358	60	298	2800	19	2781
	17—18	13,8	138	19	119	2800	6	2794
	21—26	75,8	758	6	752	2800	10	2790
	30—31	22,2	222	10	212	2800	24	2776
II	9—11	10,1	101	24	77	2800	6	2794
	14—17	11,6	116	6	110	2800	12	2788
	22—24	11,0	110	12	98	2800	9	2791
	28	1,2	12	9	3	2800	0	2800
III	1—2	29,9	299	0	299	2800	30	2770
	6—10	40,9	409	30	379	2800	10	2790
	12—17	28,1	281	10	271	2800	40	2760
	22—25	67,9	679	40	639	2800	20	2780
	28—30	17,1	171	20	151	2800	10	2790
		5	5519		4073		616	2790—1960=830

Данные метеостанции „Самарканд“, 1939—1940 гг.; НВ=2200 $m^3/га$

X	13, 17, 18, 24	16,9	169	169	0	1709	169	1540
XI	3—5, 9—10, 14, 24	32,6	326	326	0	1866	326	1540
XII	4—5, 14—16, 18	22,8	228	228	0	1768	150	1618
I	3, 6, 7, 10—14, 16, 17, 23—25, 27, 29—30	52,1	521	521	0	2139	120	2019
II	2—7, 9—10, 12, 13, 15—17, 19—20							
III	23, 28, 29	61,6	616	181	435	2200	100	2100
	2, 7, 12—16, 22—29	58,1	581	100	481	2200	200	2000
			2441		916		1065	2000—1540=460

Данные метеостанции „Самарканд“, 1952—1953 гг.

X	3	0,1	1	1	0		1	1540
XI	14, 15, 16, 22, 23, 29	20,8	208	208	0	1748	208	1540
XII	5, 7, 10—12, 15—19	33,9	339	339	0	1879	120	1759
I	10, 13, 14, 17, 19, 21, 21—26	36,9	369	369	0	2128	110	2018
II	1, 2, 8, 9, 13, 14, 21, 22, 25	58,9	589	182	407	2200	190	2010

Дата выпадения осадков		Количество осадков X		Расход осадков		Общее количество воды в метровом слое почвы после осадков W_k , $m^3/га$	Расход почвенной влаги на испарение E , $m^3/га$	Общее количество воды в метровом слое почвы до очередных осадков W_n , $m^3/га$
месяц	число	мм	$m^3/га$	на ΔW , $m^3/га$	на Φ , $m^3/га$			

Данные метеостанции „Самарканд“, 1952—1953 гг.

III	4—7, 10, 14—17	82,8	828	190	638	2200	100	2100
	14—17	6,6	66	66	0	2166	36	2130
	21—24	42,7	427	70	357	2200	130	2070
			2827		1402		895	2070—1540=530

Данные метеостанции „Самарканд“, 1968—1969 гг.

X	12, 27, 28	13,7	137	137	0	1677	137	1540
XI	2, 6, 7, 9, 19—24	24,2	242	242	0	1782	242	1540
XII	1—8, 10—11, 13—14, 16—20, 23	58,5	585	585	0	2125	60	2065
I	3—9, 17, 21—26, 29—31	108,3	1083	135	948	2200	40	2160
II	1, 10, 11, 14—17, 21—24	34,5	345	40	305	2200	100	2100
III	1, 2, 4—10 12, 13, 16—19 22—25, 28—31	50,3 12,3 79,5	503 123 795	100 50 50	403 73 745	2200 2200 2200	50 50 40	2150 2150 2160
			3813		2474		719	2160—1540=620

Данные метеостанции „Андижан“, 1962—1963 гг.; НВ=2800 $m^3/га$

X	12, 13, 19, 25	4,9	49	49	0	2009	49	1960
XI	6, 9, 11—13, 16, 17, 22, 26	56,7	567	567	0	2527	150	2377
XII	4, 10, 11, 24—26	26,6	266	266	0	2643	70	2573
I	6, 7, 10	7,9	79	79	0	2652	100	2552
II	3, 5, 11 14—16, 27, 28	27,6	276	248	28	2800	200	2600
III	1—4, 7—9, 21, 23	51,4	514	200	314	2800	300	2500
			1751		342		869	2500—1960=540

Дата выпадения осадков		Количество осадков λ		Расход осадков		Общее количество воды в метровом слое почвы после осадков W_k , $m^3/га$	Расход почвенной влаги на испарение E , $m^3/га$	Общее количество воды в метровом слое почвы до очередных осадков W_H , $m^3/га$
месяц	число	мм	$m^3/га$	на ΔW , $m^3/га$	на Φ , $m^3/га$			
Данные метеостанции „Андижан“, 1952—1953 гг.								
X	4, 17, 18	4,8	48	48	0	2008	48	1960
XI	8, 14—15, 17, 20, 21, 23, 24, 26, 30	33,5	335	335	0	2295	140	2155
XII	11, 19—20, 30—31	7,7	77	77	0	2232	100	2132
I	3, 4, 9, 15, 16, 25, 26	19,0	190	190	0	2322	90	2232
II	2, 9, 15, 21, 22, 26	56,4	564	564	0	2796	170	2626
III	5—7, 10, 15—18, 22—24, 26, 28	60,4	604	174	430	2800	225	2575
			1818		430		773	2575—1960=615

Данные метеостанции „Андижан“, 1968—1969 гг.

X	28, 31	10,2	102	102	0	2062	102	1960
XI	9, 10, 13, 17, 21, 30	12,7	127	127	0	2087	127	1960
XII	1—4, 6—10, 15, 17, 18	55,0	550	550	0	2510	4	2506
		10,2	102	102	0	2608	20	2588
I	2—4, 6, 7, 9—11, 18	14,9	149	149	0	2737	42	2695
		9,1	91	91	0	2786	0	2786
	21—26, 31	95,7	957	14	943	2800	0	2800
	1, 9, 10	15,1	151	0	151	2800	16	2784
II	11, 12, 17, 18, 22—24	8,0	80	16	64	2800	10	2790
		32,5	325	10	315	2800	0	2790
	1—4, 6, 8—11	54,6	546	10	536	2800	15	2785
III	13, 14, 17—19, 22—25, 30—31	7,1	71	15	56	2800	15	2785
		55,7	557	15	542	2800	40	2760
			3808		2607		401	2760—1960=800

Год	Среднемесячный расход, м³/сек											Среднего- довой рас- ход, м³/сек
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Река Нарын (в створе Учкурган)												
1933	130	149	186	298	685	808	600	543	313	208	172	157
1934	105	138	161	327	641	1720	1110	697	419	303	243	211
1935	177	186	218	314	808	1031	915	673	354	249	219	167
1936	143	165	175	393	904	1074	696	493	317	253	209	166
1937	162	169	175	240	688	986	852	523	338	246	201	181
1938	165	160	169	329	658	462	587	426	260	215	186	161
1939	152	153	176	217	827	604	632	492	278	192	173	149
1940	(137)	(149)	(155)	211	521	1062	682	477	253	233	204	162
1941	(152)	(146)	(202)	393	1025	1117	629	540	304	223	(211)	(178)
1942	156	151	201	384	1113	1311	943	653	364	241	216	180
1943	167	163	181	275	656	916	867	565	343	229	202	173
1944	158	155	209	258	515	728	849	584	319	223	198	172
1945	164	155	173	373	664	1153	858	551	(319)	230	207	177
1946	175	165	178	440	685	808	907	591	302	222	253	225
1947	199	194	210	272	494	641	629	452	292	216	209	163
1948	145	149	178	309	632	877	1030	643	370	250	208	174
1949	150	158	185	345	751	1072	1024	676	399	283	222	175
1950	174	157	194	212	842	840	768	572	332	236	205	160
1951	163	163	192	272	794	840	774	554	298	306	281	223
1952	184	187	205	512	827	1410	1301	756	385	275	242	202
1953	193	196	242	319	1044	1320	973	632	398	304	276	238
1954	108	202	242	456	673	1137	1242	1120	574	374	296	231
1955	105	201	234	341	821	1209	678	667	357	260	226	210
1956	168	183	193	352	909	1004	1214	642	378	264	221	190
1957	173	167	203	236	367	888	702	511	280	215	191	162
1958	148	152	173	423	585	1175	1244	666	373	280	224	194
1959	194	192	219	631	738	1320	1259	805	547	338	263	221
1960	187	201	213	397	943	1445	1402	768	448	307	261	201
1961	132	177	186	371	753	630	583	500	356	247	205	153
1962	133	149	179	221	435	832	682	512	299	215	191	151

Река Карадарья (в створе Кампыррават)

1933	37,0	37,2	39,8	86,4	175	147	103	90,1	54,6	44,1	36,5	35,7	74
1934	30,9	38,8	42,1	140	317	647	363	214	106	83,1	59,4	49,9	174
1935	42,7	45,8	59,6	100	220	295	220	426	71,4	64,3	81,1	59,4	115
1936	49,1	50,3	56,6	236	676	590	337	205	102	69,4	59,6	48,9	207
1937	45,8	44,6	49,9	112	285	373	230	127	83,3	74,6	62,7	49,9	128
1938	46,5	45,0	54,4	142	230	153	145	99,1	60,4	52,1	44,0	40,8	93
1939	38,0	36,8	39,7	57,4	192	141	126	78,7	53,7	46,8	42,7	38,8	74
1940	31,8	28,9	31,9	50,7	150	217	111	85,3	55,8	65,0	60,5	46,4	78
1941	39,1	39,4	64,4	178	350	269	141	102	65,6	49,9	46,2	40,9	115
1942	36,9	36,5	60,1	150	372	377	240	126	82,2	64,6	66,9	47,1	138
1943	(41,2)	41,0	63,9	117	275	308	228	115	77,5	63,8	64,5	54,6	120
1944	47,7	44,2	58,4	121	211	218	204	123	75,3	69,8	86,4	66,3	110
1945	52,8	47,6	67,5	207	382	442	323	173	103	79,9	74,1	61,3	168
1946	57,0	57,2	72,3	212	277	248	204	140	74,5	62,8	60,1	51,8	129
1947	48,8	44,4	55,0	76,7	117	142	101	81,3	58,0	52,0	56,3	44,7	73
1948	39,3	37,8	44,4	94,5	209	252	302	124	74,1	66,7	57,1	50,4	113
1949	43,8	42,3	53,6	159	294	344	205	159	107	80,5	62,5	50,8	140
1950	44,4	43,1	55,0	81,0	286	252	157	90,6	62,5	52,3	50,0	37,9	101
1951	35,9	34,4	45,5	96,3	277	235	203	131	74,9	104	107	75,3	118
1952	58,1	57,3	64,3	266	446	453	327	191	113	71,3	58,1	49,3	180
1953	46,0	47,4	62,3	124	380	413	279	148	95,7	86,3	82,8	75,1	153
1954	59,6	57,5	82,6	223	250	376	295	245	131	93,9	74,1	59,3	162
1955	51,7	57,1	86,7	145	347	407	209	170	96,8	73,6	65,8	62,6	148
1956	51,8	54,5	70,4	177	358	317	277	124	84	70,6	57,6	47,0	141
1957	40,7	41,0	55,5	85,1	113	253	211	128	63,1	63,2	59,7	48,4	97
1958	42,4	41,2	57,7	261	319	522	404	168	99,3	82,9	61,9	53,3	176
1959	44,3	43,3	61,0	192	230	303	208	123	89,8	68,9	58,3	52,0	123
1960	47,1	52,2	61,6	136	344	378	253	113	65,6	64,4	63,1	49,5	136
1961	49,9	41,6	58,2	120	181	113	90,7	72,1	56,3	50,9	46,2	37,5	76
1962	32,7	37,5	46,3	60,0	125	149	92,2	62,5	50,1	46,5	41,9	36,0	65

Левобережные притоки Карадарьи

1933	31,9	33,7	42,0	106,4	153,5	136,2	88,5	78,6	57,5	42,6	34,8	36,6	70,2
1934	35,3	42,2	51,9	140,1	218,7	306,8	159,3	99,4	58,7	52,5	44,8	42,3	104,3
1935	38,2	42,3	58,9	127,2	217,0	223,8	168	102,1	64,6	57,4	51,2	44,3	99,6

Год	Среднемесячный расход, м³/сек												Среднего- довой рас- ход, м³/сек
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Левобережные притоки Карадарьи													
1936	42,5	47,8	53,4	190,6	373,9	262,8	148,5	107,2	69,0	53,0	45,7	42,0	119,7
1937	37,2	36,2	42,8	104,6	124,7	186,7	140,3	85,5	61,4	48,5	46,2	46,7	80,6
1938	37,0	37,4	45,9	133,2	148,2	111,6	100,6	75,5	46,9	38,8	38,1	36,1	70,8
1939	31,0	33,7	43,6	77,4	160,8	126,0	104,3	69,3	49,8	36,3	35,0	31,8	65,7
1940	28,0	32,4	39,5	46,8	187,2	201,4	101,6	73,7	46,7	46,5	49,3	38,1	74,3
1941	36,1	41,7	75,9	163,0	216,8	158,6	95,9	83,4	52,2	41,3	43,5	41,3	87,3
1942	37,3	39,3	73,6	190,6	310,0	223,6	153,1	91,2	62,0	45,5	45,6	38,9	109,2
1943	36,0	39,5	58,6	143,3	244,2	227,4	150,4	92,1	58,9	49,1	48,4	43,5	99,4
1944	37,7	39,0	60,3	128,2	153,4	127,2	132,9	90,7	51,1	43,7	46,8	46,7	79,1
1945	39,1	40,3	56,4	155,2	217,1	249,5	164,9	101,5	62,7	48,3	48,8	51,1	102,3
1946	39,8	44,0	66,7	239,1	203,8	150,7	115,8	89,4	51,1	45,6	50,1	45,7	95,2
1947	42,9	43,6	58,5	90,6	117,4	135,5	95,3	78,9	56,0	49,5	67,3	46,8	73,9
1948	42,2	44,2	52,6	177,0	257,0	185,7	168,5	97,1	62,9	50,7	47,3	40,2	94,2
1949	43,6	47,7	60,2	223,4	342,9	272,3	185,6	115,9	74,8	57,8	52,8	63,3	127
1950	42,8	43,5	54,9	89,1	215,2	180,4	128,8	91,1	58,6	44,1	45,7	52,1	86,2
1951	39,9	41,7	55,2	110,4	227,7	182,2	137,7	98,2	56,9	62,3	90,3	63,3	97,2
1952	51,5	55,1	69,3	297,4	338,1	297,7	209,0	122,1	79,6	61,4	56,0	52,1	140,7
1953	47,4	53,7	81,1	173,9	335,5	279,6	173,9	106,2	68,3	70,0	74,7	69,2	127,2
1954	58,3	60,8	92,0	227,3	241,4	279,8	247,5	259,3	105,5	74,9	62,6	56,5	147,2
1955	49,6	52,2	84,3	164,0	244,4	226,9	137,8	127,0	72,4	54,4	52,6	56,1	110,1
1956	45,6	48,0	65,1	193,2	249,3	176,7	158,6	92,1	59,6	48,8	42,8	39,5	101,6
1957	37,8	39,6	59,1	101,5	121,6	177,2	160,7	100,1	56,3	47,3	45,7	40,5	82,3
1958	39,9	43,3	73,5	282,9	266,0	308,3	233,8	118,7	71,4	62,5	54,0	48,8	133,6
1959	44,9	46,7	74,4	317,0	253,2	234,0	163,9	101,8	72,4	55,3	49,9	46,4	121,6
1960	46,2	55,4	70,6	206,9	417,1	322,9	195,3	104,4	70,0	56,2	55,8	46,9	129
1961	39,3	39,3	64,1	144,5	158,8	106,3	82,3	69,5	48,8	39,4	36,0	33,8	71
1962	32,5	36,6	51,6	86,5	121,6	140,2	99,2	68,8	48,9	38,3	38,1	35,8	74,8

Левобережные притоки Сырдарьи в пределах Ферганской долины
(в створах, замыкающих зону формирования стока)

1933	51,9	45,5	49,4	78,8	175,6	256,5	320,3	317,9	147,7	75,8	60,0	53,4	136,2
1934	52,1	50,8	59,9	122,3	179,8	425,4	372,0	311,7	152,7	89,2	71,4	65,8	162,7
1935	58,3	53,8	58,8	95,3	198,4	277,1	357,3	315,7	140,8	83,1	71,5	61,7	147,7
1936	56,7	51,6	53,6	97,4	237,3	332,1	337,3	245,6	176,0	100,1	78,5	82,7	154,0
1937	61,3	58,7	55,5	85,8	200,8	295,7	333,1	275,5	163,4	93,0	71,0	54,2	145,7
1938	56,6	54,9	54,5	89,4	233,2	227,9	285,2	245,2	126,8	79,2	62,0	58,2	131,1
1939	55,1	52,0	49,7	71,4	176,5	229,4	303,8	260,4	141,1	90,9	65,3	54,6	129,2
1940	49,8	45,8	46,5	78,0	160,5	290,3	310,9	247,4	142,2	84,3	69,0	58,4	131,9
1941	54,2	51,5	64,7	139,7	314,8	373,4	327,9	288,5	142,4	100,6	67,0	63,8	165,7
1942	60,5	58,4	68,0	132,4	287,1	380,0	509,9	302,5	185,1	154,3	89,1	68,4	191,3
1943	58,2	55,4	62,9	123,0	211,8	304,6	367,6	276,6	168,4	90,6	75,7	67,3	155,1
1944	60,4	56,9	59,2	88,9	195,2	240,4	409,5	324,5	152,1	80,8	67,6	56,9	149,4
1945	55,2	53,2	58,0	126,3	238,2	401,8	406,9	208,9	184,4	113,9	80,3	71,0	174,8
1946	60,0	53,5	56,6	135,5	247,2	285,6	343,3	277,1	155,0	101,3	79,1	73,4	155,6
1947	70,8	66,9	64,9	98,9	205,9	254,9	284,1	276,5	166,1	74,0	70,2	63,2	141,4
1948	57,9	53,0	56,3	118,8	254,1	405,8	443,5	352,7	164,8	94,7	67,1	59,9	177,4
1949	57,2	53,9	56,3	125,1	258,5	342,5	392,8	314,7	170,1	99,5	91,0	78,1	170,0
1950	67,8	62,1	66,9	96,6	259,5	317,3	365,4	316,8	155,4	93,8	76,7	68,3	161,1
1951	61,4	57,7	60,6	92,2	203,0	226,4	246,8	246,3	141,9	112,8	91,2	73,1	134,5
1952	66,3	62,7	70,0	193,1	299,6	430,3	442,7	332,7	169,5	113,5	88,7	77,2	195,5
1953	71,1	66,5	74,6	125,2	306,3	398,0	409,3	281,5	184,2	97,4	88,9	78,9	181,8
1954	70,1	66,0	71,3	141,6	227,6	318,2	332,6	328,5	190,3	113,2	92,1	79,8	169,3
1955	68,7	64,3	67,9	106,9	207,0	329,1	292,4	356,7	158,3	97,0	80,9	70,5	158,3
1956	63,1	58,2	59,5	125,7	248,3	260,0	411,0	275,9	154,8	89,1	72,1	63,2	156,7
1957	55,8	51,3	52,1	72,3	110,1	236,4	248,9	220,8	111,4	78,3	63,0	56,1	113,0
1958	59,0	55,8	60,8	149,2	227,7	393,2	429,7	278,2	169,5	103,8	84,0	76,3	173,9
1959	67,0	64,1	70,9	205,0	262,2	370,1	381,2	329,3	243,6	112,6	88,9	77,9	189,4
1960	67,6	62,0	66,4	128,7	246,1	337,4	356,2	293,1	156,2	195,0	78,6	69,8	171,4
1961	59,1	53,9	57,0	91,3	207,7	227,2	289,3	241,5	159,0	84,0	65,1	55,9	132,5
1962	52,2	51,4	52,1	79,9	135,3	272,1	282,4	236,9	139,6	74,5	61,1	55,4	114,7

Год	Среднемесячный расход, м³/сек												Среднего- довой рас- ход, м³/сек
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Реки Цирчик, Ангрен, Келес (в створах, замыкающих зону формирования стока)													
1933	71,5	15,1	102,9	255,3	525,8	629,2	413,1	244,4	155,2	104,5	90,2	93,0	224,9
1934	80,5	111,9	125,1	401,3	601,4	1091,4	783,6	424,7	212,7	142,1	109,6	98,1	348,5
1935	83,0	87,1	141,3	261,4	561,6	553,0	702,6	318,1	163,1	115,6	100,3	88,1	264,6
1936	71,6	79,7	84,4	279,4	566,2	556,3	347,1	210,2	147,9	103,9	85,8	77,3	220,8
1937	70,8	68,1	67,3	158,8	428,3	519,7	381,1	204,8	129,4	93,3	87,3	74,8	190,3
1938	76,1	82,1	91,6	278,1	503,7	326,2	242,9	182	110,6	83,5	68,7	68,4	176,2
1939	62,1	63,6	90,5	166,8	540,6	514,3	316,8	197,4	118,9	89,4	84,8	75,8	193,4
1940	72,4	82,0	83,5	228,9	378,7	573,3	43,8	199,1	112,2	114,0	110,1	88,2	173,7
1941	78,0	99,3	203,8	473,0	838,4	743,2	420,7	262,4	149,9	113,3	98,8	95,1	295,9
1942	80,7	77,5	180,7	376,9	812,3	846,1	541,6	262,7	154,9	107,8	103	83,4	302,3
1943	70,3	69,1	102,8	263,0	520,0	657,7	504,2	278,9	160,6	113,9	98,3	84,9	244,5
1944	77,9	73,8	127,7	251,6	458,4	422,8	337,6	189,5	117,2	86,8	88,2	67,3	189,9
1945	62,0	64,0	92,2	303,3	480,2	670,3	473,0	242,6	143,1	98,8	92,1	84,8	234,0
1946	81,6	91,8	129,3	505,1	625,7	562,8	398,1	239,1	144,2	107,4	106,7	96,3	277,3
1947	85,6	82,8	120,3	246,9	382,2	442,6	349,3	210,5	141,5	110,3	136,4	99,3	200,7
1948	89,7	84,6	118,7	363,0	721,6	684,6	604,1	290,8	159,7	113,3	93,8	87,4	284,2
1949	79,4	75,7	110,0	344,5	785,8	790,1	620,5	316,7	175,7	120,6	98,5	80,4	297,8
1950	75,5	68,6	100,6	151,3	439,7	494,6	322,2	205,7	119,9	89,8	79,2	74,8	185,2
1951	68,5	62,4	93,7	211,9	420,4	392,7	377,5	231,5	126,1	158,2	181,3	120,9	203,3
1952	97,9	100,3	133,8	503,1	692,4	841,1	724,6	388,0	191,1	132,0	106,9	94,6	333,8
1953	76,9	81,8	172,0	267,6	701,4	752,9	476,3	246,7	162,1	129,7	124,9	114,9	274,8
1954	101,3	93,8	155,2	433,4	569,8	582,1	526,2	363,9	191,5	124,4	100,5	85,1	278,1
1955	79,3	78,0	119,5	218,9	463,8	617,3	355,1	248,6	134,4	97,5	84,2	77,9	214,5
1956	69,7	67,1	98,7	346,2	572,1	487,7	474,8	219,9	136,7	96,2	81,8	72,3	227,0
1957	68,9	63,6	90,0	151,6	240,5	433,3	287,1	180,4	111,3	93,6	88,1	81,5	157,2
1958	76,1	76,6	153,6	590,4	677,9	935,6	801,1	287,3	219,8	146,3	112,3	106,4	348,6
1959	87,2	81,0	138,6	708,3	732,6	830,6	597,3	366,3	227,1	143,2	123,2	105,3	378,4
1960	98,6	116,1	142,0	330,3	716,9	1054,0	800,7	401,4	222,7	137,2	120,2	100,0	274,3
1961	85,5	77,2	109,8	242,0	467,0	370,9	277,7	202,4	133,8	97,7	80,2	76,0	184,1
1962	71,6	73,6	116,7	224,9	428,5	578,7	436,1	237,7	146,9	109,4	114,9	97,1	219,6

Река Арысь (в створе Арысь)

1930	36,8	46,9	73,8	93,1	49,4	21,6	10,4	5,7	15,3	27,1	32,4	31,4	37
1931	48,4	55,0	111	101	48,2	39,2	22,6	11,1	17,3	25,6	32,9	46,3	46,6
1932	43,0	46,4	90,6	76,0	65,4	32,8	9,8	9,1	21,0	29,7	34,1	38,5	41,4
1933	(44,0)	(49,5)	36,7	110	44,0	35,9	15,2	12,0	18,5	28,5	34,1	(68,1)	44,7
1934	(67,9)	(86,2)	68,2	153	97,3	66,1	36,0	18,4	26,6	36,4	41,2	43,7	61,8
1935	43,3	62,5	124	84,4	43,3	30,9	20,2	8,7	23,3	36,9	42,7	45,8	46,3
1936	38,1	62,5	65,0	25,2	46,9	16,0	8,5	10,5	19,3	29,4	34,5	38,2	32,8
1937	36,4	40,1	41,0	52,4	38,2	16,0	7,7	7,2	13,0	26,2	31,1	36,6	28,0
1938	44,3	56,9	63,1	54,5	13,5	7,4	6,4	6,5	12,9	24,3	28,6	32,3	29,2
1939	35,6	45,4	54,4	55,1	32,5	9,3	7,1	5,8	9,6	21,7	32,1	38,7	29,0
1940	43,8	60,3	70,6	46,3	32,3	10,1	5,6	4,6	8,6	20,2	32,7	35,8	30,9
1941	49,7	75,1	109	93,1	52,5	25,2	9,0	6,4	14,1	26,3	32,4	46,7	45,0
1942	46,2	41,1	123	123	64,4	37,2	18,8	8,0	17,3	29,6	35,3	40,2	39,5
1943	38,4	51,4	69,0	95,9	64,6	21,4	9,6	7,7	15,3	29,2	36,9	(44,5)	40,3
1944	45,1	47,8	53,3	39,7	23,0	10,6	8,4	9,0	15,0	27,7	37,1	(44,5)	30,9
1945	48,0	58,2	90,2	92,6	36,0	17,6	12,2	8,7	15,4	26,6	39,0	53,2	40,7
1946	52,9	74,3	80,7	127	30,5	18,3	11,8	10,8	19,6	36,2	42,8	43,4	45,7
1947	46,3	58,7	71,7	41,7	41,3	23,6	9,0	8,0	16,6	31,5	39,9	38,4	35,6
1948	41,1	42,7	73,6	89,7	52,7	13,0	9,4	5,5	18,2	30,1	35,7	41,7	37,8
1949	51,6	55,3	99,8	187	159	62,2	28,5	20,1	31,5	47,4	49,9	46,9	69,9
1950	71,2	63,8	148	71,2	31,1	21,6	11,6	8,7	24,3	35,9	41,8	44,9	47,8
1951	51,5	41,2	61,4	57,9	24,0	14,7	8,5	6,9	16,5	32,6	60,0	58,5	35,3
1952	55,9	88,2	109	133	131	55,0	43,4	15,5	27,3	40,1	43,9	51,9	61,1
1953	51,9	67,8	128	91,9	50,1	41,8	12	11,5	25,5	42,8	63,7	64,9	54,3
1954	71,5	72,5	125	194	73,8	44,3	39,9	22,9	32,2	45,9	49,6	50,3	69,8
1955	49,8	54,5	101	109	69,9	34,4	12,8	10,4	27,1	40,5	46,0	49,4	50,4
1956	49,1	55,0	90,6	107	54,1	25,1	9,1	7,1	22,1	36,8	41,2	42,7	44,9
1957	37,0	43,6	69,1	62,0	21,2	16,6	6,7	6,3	1,1	30,6	41,7	60,3	31,2
1958	61,8	71,1	106	24,4	15,0	85,8	60,2	22,2	29,3	40,1	44,2	53,7	51,1
1959	55,7	68,6	126	290	77,8	54,8	31,3	20,3	31,9	43,6	54,5	59,4	76,0
1960	67,4	87,1	117	144	135	72,6	40,3	12,8	27,7	42,3	48,4	48,6	70,0
1961	49,9	45,8	49,4	66,6	19,1	7,5	4,4	6,6	9,7	23,1	24,7	35,0	29,0
1962	32,5	40,4	43,8	28,1	18,9	6,9	3,4	3,1	8,6	25,9	27,5	27,8	22,2

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава I. Водохозяйственные системы в районах орошаемого земледелия и перспективы их развития	5
Сырдарьинская ВХС	10
Амударьинская ВХС	17
Глава II. Водный баланс орошаемой территории	28
Водный баланс поля	29
Поливная норма	33
Суммарное испарение	39
Дренажный сток	48
Потери оросительной воды	58
Атмосферные осадки	66
Возвратные воды	78
Норма водоподачи на орошаемое поле	83
Глава III. Моделирование на ЭВМ водохозяйственных систем орошаемых районов	85
Упрощенная линейная схема Сырдарьинской ВХС	90
Методика расчета на ЭВМ оросительной способности ВХС	104
Оптимизация режима работы ГЭС, входящих в ВХС орошаемых районов	104
Литература	108
Приложения	122

Абдулахад Захидович Захидов

ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ СРЕДНЕЙ АЗИИ

*Утверждено к печати Ученым советом
ордена Трудового Красного Знамени Института кибернетики с ВЦ,
Отделением механики и процессов управления*

Редактор *С. С. Бассина*
Технический редактор *М. Н. Сухарева*
Корректор *А. И. Айрапетова*

P10150. Сдано в набор 23/II-71 г. Подписано к печати 27/IV-71 г. Формат 60×90¹/₁₆-4,125
бум.л. 8,25 печ. л. Уч.-изд. л. 8,2. Изд. № 662. Тираж 1000. Цена 95 к.

Типография издательства „Фан“ УзССР, ул. Черданцева, 21. Заказ 51.

Адрес Издательства: ул. Гоголя, 70.