

В.А. ДУХОВНЫЙ
канд. техн. наук, директор

Б.Е. МИЛЬКИС
канд. физ.-мат. наук, зав. отделом
(САНИИРИ им. В.Д. Журина)

УТОЧНЕНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТОВ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ
НА ОРОШЕНИЕ В АРИДНОЙ ЗОНЕ, ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ
ПРИЛОЖЕНИЕ И ЗАДАЧИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Существующие методы расчетов оросительных норм, несмотря на большие исследования, проведенные в этом направлении, в значительной мере не удовлетворяют всему многообразию факторов и всестороннему учету природно-климатических и мелиоративных условий. В результате в поисках максимального приближения расчетных норм и фактическим в первые постоянно вносятся определенные коррективы, однако при этом все факторы расчетного водопотребления не охватываются. Часто за основу норм орошения принимаются проведенные по различным методикам поливные опыты, не учитывающие даже всех источников питания растений.

Известны расчетные формулы А.Н. Костякова (1951 г.), в которых оросительная норма (M) определяется как

$$M = E + E_0 - P_0 - \Delta W, \quad (I)$$

где E — транспирация растений;

E_0 — испарение с поверхности почвы за вегетацию;

ΔW — используемые запасы влаги почвенных вод в активном слое;

$$\Delta W = W_0 - W + K,$$

где W_0 и W — запасы влаги в почве, соответственно, в начале и конце вегетации;

K — подпитывание капиллярной влагой из грунтовых вод почвенной влагой;

P_0 — количество осадков, проникающее в почву за вегетацию.

Для определения транспирации растений А.Н.Костяков пользовался эмпирическими зависимостями от урожайности, а также данными опытных наблюдений за влажностью почвы. Им аналогична формула С.Н.Рыкова (1948).

С.М.Алпатьев предлагает определять оросительную норму по формуле:

$$M = [K_n \times U_c - (O_c - \Delta O_c) + (B_i - B_{i-1})] \cdot K_{mn} \quad (2)$$

Здесь U_c — соответствует $E + E_o$ в формуле (1);

$O_c - \Delta O_c$ — соответствует P_o ;

$B_i - B_{i-1}$ — соответствует ΔW_i ;

K_n — коэффициент влагообмена расчетного слоя с нижележащими;

K_{mn} — коэффициент, учитывающий потери в процессе полива.

Как видим, формула Алпатьева отличается от формулы Костякова учетом потерь на технику полива и учетом влагообмена со слоями, расположенными ниже корнеобитаемого, с помощью эмпирического коэффициента.

Проф. С.Д.Лысоголов определяет оросительную норму с учетом вовлечения дополнительной влаги из грунтовых вод, как

$$M_o = \sum B - O(B - \beta) - \Gamma, \quad (3)$$

где $\sum B$ — суммарное водопотребление за период вегетации;

O — осадки за тот же период;

$B - \beta$ — изменение запасов влаги в почве;

Γ — питание растений из грунтовых вод.

"Средазгиэроводхоз" (В.Р.Шредер и др.) в 1966 г. предложил метод определения оросительных норм по формуле, полученной на основе обработки большого количества различных наблюдений:

$$M = 10 K_1 \times K_2 \times K_3 \cdot (E - O). \quad (4)$$

Здесь E — испаряемость с водной поверхности;

O — осадки;

K_1 — коэффициент для каждого вида культуры;

K_2 — коэффициент длины вегетационного периода;

K_3 — коэффициент мелиоративного районирования.

Недостатком почти всех приведенных формул является недоучет полного объема всего водопотребления, включая невегетационное; принятие ограниченного расчетного слоя почвы без учета просачивания влаги ниже; эмпирический подход; игнорирование различных потерь в зависимости от техники полива. Отсюда происходили порой такие дезориентирующие выводы о снижении с помощью дождевания водопотребления чуть ли не в 2 раза (!) (Меднис, 1973).

Кроме того, всеми указанными формулами и методами не учитывается важнейшая роль воды в условиях аридной зоны, особенностью которой является высокое испарение, намного превышающее осадки, а также взаимодействие оросительных вод и грунтовых, имеющих различную степень минерализации. Вследствие этого в процессе орошения происходит подтяжка солей из грунтовых вод в зону аэрации, и для того, чтобы снизить это количество солей до исходного или ниже, необходимо затратить определенное количество воды с целью создания промывного режима орошения. На имеющиеся недостатки существующих методов расчетов справедливо указывал еще в 1967 г. член-корр. АН УзССР Р.А.Алимов (САНИИРИ).

Общее водопотребление в аридной и полуаридной зоне складывается как бы из двух частей: количества воды, затрачиваемого на покрытие дефицита естественной влаги против потребной суммарной эвапотранспирации, и мелиоративных затрат воды:

$$O_p = (U + T_p) - O_c \pm \bar{P} \pm W + M, \quad (5)$$

где O_p — оросительная норма нетто;

$(U + T_p)$ — суммарное испарение;

O_c — осадки;

$\pm \bar{P}$ — взаимодействие с грунтовыми водами;

M — затраты воды на мелиоративные нужды (недопущение соленакпления или снижение запасов солей);

$\pm W$ — изменение влаги в зоне аэрации.

Первая часть этого выражения зависит от климатических условий, состава культур и способа полива. Действительно, исследованиями, проведенными отделом водного баланса САНИИРИ (Б.Е.Милькис), для территории Средней Азии

установлено, что суммарное испарение для данной культуры и определенной местности для каждого способа полива изменяется очень незначительно.

При этих исследованиях за основу был принят наиболее объективный метод теплового баланса. Он основан, как известно, на уравнении теплового баланса деятельной поверхности:

$$R = B + P + LE \quad (6)$$

где R - радиационный баланс;

B - теплообмен в почве;

P - теплообмен с атмосферой;

LE - затраты тепла на суммарное испарение.

Для измерений использовались не только стандартные метеорологические и актинометрические приборы, но и специальная аппаратура конструкции АФНИИ: теплосансографы, градиентометры и др.

Исследования показали, что экстремальные значения сумм испарения хлопчатника за период отличаются на 50-170 мм в зависимости от района наблюдений. В табл. I в качестве примера приведены результаты расчетов испарения по данным наблюдений на хлопковом поле в северной Каракалпакии.

Таблица I

Сезонные суммы испарения с хлопкового поля, мм

Годы	Сумма за май - октябрь
1970	862
1971	794
1972	725 ^{x)}
1973	778
1974	766

x) Сумма за неполный период.

Как видим, наибольшая разница сезонных сумм составляет почти 100 мм. По данным исследований (Ф.А.Мунинов, 1970), на опытных полях агрометеостанции Бозсу под Ташкентом сезонные суммы могут отличаться почти на 190 мм (табл. 2).

В этих опытах значение суммарного испарения определялось при поверхностном поливе по бороздам.

Таблица 2

Суммарная величина испарения с хлопкового поля за вегетационный период, мм

Годы	Сумма за период от всходов до губительного заморозка
1960	627
1961	815
1962	740
1964	658
1965	661

Исследованиями в совхозе № 9 Каршинской степи, а также на опытной станции орошения в Калининском районе Ташкентской области установлено, что суммарное испарение при дождевании не меньше, а несколько больше, чем при поверхностном поливе. Хотя такой вывод, на первый взгляд, кажется неожиданным, он вполне закономерен, так как при дождевании общие затраты воды несколько больше за счет дополнительных потерь, которые отмечаются в результате испарения при распылении влаги.

Таблица 3

Сопоставление сезонных сумм испарения при различных способах полива, мм

Район исследования, годы, автор	Суммарное испарение		$K_{сп}$
	поверхностный полив	дождевание	
Кашкадарьинская область, Каршинский район, совхоз № 9, 1974, Т.М.Нигманов	792	816	1,03
Ташкентская область, Калининский район, опытная станция "НИСТО", 1971-1974, Г.А.Ахмедов, Р.Р.Салихов	788	796	1,01

Как видно из табл. 3, если суммарное испарение при поверхностном поливе принять за единицу, то при дождевании расход воды даже увеличивается на 1-3%. Кажущееся снижение водопотребления при поливе дождеванием объясняется тем, что недополученное за счет орошения количество влаги растения

потребляют за счет грунтовых вод и влаги зоны аэрации. Это четко видно из анализа воднобалансовых исследований в том же совхозе № 9 и на НИСТО (выполнены научными работниками САНИИРИ канд.сельхоз.наук А.Рамазановым, Т.Нигмановым и др.).

Внутрипочвенное орошение значительно снижает суммарное испарение ($K_{cl} = 0,7 - 0,8$) в связи с тем, что при этом способе полива отсутствует испарение с водного зеркала борозд и с поверхности почвы, а интенсивность испарения из почвенного слоя, доведенного до максимального капиллярного увлажнения, не имеющего непосредственного контакта с дневной поверхностью, значительно ниже. Таким образом, внутрипочвенное орошение является чуть ли не эффективным способом снижения величины ($U + T_p$).

Однако до сего времени внутрипочвенное орошение не вышло за пределы опытно-производственных исследований по причине дороговизны его первоначальной стоимости и дефицитности полимерных труб, из которых оно строится. Но, очевидно, в ближайшее десятилетие этот метод орошения прочно войдет в жизнь.

Другими, относительно менее эффективными, способами снижения суммарного испарения, однако достаточно действенными, являются определенные агротехнические приемы, в частности, загущенные посевы, повышенные дозы минеральных удобрений и т.д. Хотя при этом расход воды на 1 га несколько увеличивается, однако на единицу урожая эта величина снижается на 8-15%. Однако отклонения от нормальной агротехники отрицательно сказываются на величине суммарного испарения, в частности:

- затяжка поливов сверх нормативов по продолжительности;
- отсутствие обработок;
- завышение поливной нормы.

Изложенное выше позволяет считать, что первая часть выражения расчетной оросительной нормы ($U + T_p$) — ос существенно не изменяется из года в год для каждой зоны и является тем количеством влаги, которое должно получить расте-

ние непосредственно на единицу площади для создания биологически возможной массы урожая. Данные по этой части водопотребления (Б.Е.Милькис) приводятся в табл. 4. Здесь подсчитано суммарное испарение минус осадки для осредненного гектара, исходя из среднего для каждой зоны состава культур в севообороте.

Таблица 4

Удельные величины суммарного испарения, осадков и дефицита водопотребления в хлопковой зоне Узбекистана, м³/га

Наименование областей	Величина суммарного испарения		Атмосферные осадки		Величина водопотребления, необходимая для покрытия суммарного испарения	
	год	вегетац. период	год	вегетац. период	год	вегетац. период
Ташкентская	9910	8030	3850	1100	6060	6930
Сырдарьинская	9960	8070	3220	970	6740	7100
Джизакская	10300	8360	3720	1040	6580	7320
Ферганская	9560	7810	1650	550	7910	7260
Андижанская	9480	7830	2940	920	6540	6910
Наманганская	9610	7940	2230	770	7380	7170
Самаркандская	10240	8310	3470	1050	6770	7260
Бухарская	10420	8450	1450	440	8970	8010
Кашкадарьинская	10570	8570	3810	1060	6760	7510
Сурхандарьинская	10480	8520	2530	670	7950	7850
Хорезмская	10770	8460	980	340	9790	8120
КК АССР	11010	8200	1060	430	9950	7770

Для эксплуатационного периода системы, при котором мелиоративные процессы установились и период освоения новых земель завершился, $\pm W$ может быть принят равным нулю. Для периода освоения новых земель эта величина существенно изменяется и должна обязательно учитываться в составе водопотребления.

Надлежит наблюдения за изменением влажности массивов новоорошаемых земель при глубоком залегании грунтовых вод в Го-

лодной степи в 1966-1971 гг. показали, что ежегодно на увеличение запасов влаги в почвенном слое и на пополнение уровня грунтовых вод расходовалось в среднем по зоне с исходно глубокими грунтовыми водами от 2,9 до 5,8 тыс.м³/га. При этом увеличение влажности до величины, близкой к предельной поливной влагоемкости, идет за счет как инфильтрации вниз со скоростью 3-5 м/год для условий Голодной степи, так и подъема уровня грунтовых вод и капиллярной каймы, соответственно, на 1-2,2 м в год. После смыкания влаги на уровне ППВ изменение происходит только за счет подъема уровня грунтовых вод из года в год и сезонных колебаний влажности в корнеобитаемом слое.

С целью определения научно обоснованных параметров дополнительного расходования воды на массивах нового орошения организованы наблюдения отдела водного баланса и лаборатории почвенных исследований и промывок земель в Каршинской степи. Эти исследования должны помочь в установлении величины ω для вновь орошаемых земель. Для мелиоративно улучшаемых земель с исходно высоким залеганием уровня грунтовых вод, если в результате мелиоративных мероприятий снижается среднегодовой уровень грунтовых вод, величина ω может быть определена (с минусовым знаком), как

$$-\omega = \Delta h \cdot \mu, \quad (7)$$

где Δh - снижение уровня грунтовых вод;

μ - водоотдача грунта.

Рассматривая в данном случае орошение в эксплуатационный период, характерное для большей части территории Средней Азии, Казахстана и Закавказья, видим, что самым существенным образом величина водопотребления зависит от взаимодействия орошения с грунтовыми водами что, как известно, определяется характером мелиоративного режима.

Различают четыре мелиоративных режима: автоморфный, полуавтоморфный, полугидроморфный и гидроморфный (табл. 5).

При переходе от автоморфного режима к последующим (табл. 5) необходимо обратить внимание на увеличение общего расходования воды за счет непроизводительного испарения. Чем ближе к поверхности земли уровень грунтовых вод, тем больше

Таблица 5

Основные характеристики мелиоративных режимов

Наименование мелиоративного режима	Характер взаимодействия с грунтовыми водами	Питание из грунтовых вод и мелиоративная доля, тыс.м ³ /га	Испарение из грунтовых вод, тыс.м ³ /га
Автоморфный	Грунтовые воды не подпитывают оросительную влагу, инфильтрация идет свободно вниз	$\pm \bar{n} = 0,05 - 0,2 \Sigma (u + T_p) - 0c$ $M = 0$	0
Полуавтоморфный	Грунтовые воды подпитывают инфильтрацию оросительной воды, но сами незначительно участвуют в питании растений	$-\bar{n} \leq 0,1 \div 0,2 \Sigma (u + T_p) - 0c$ $M = 0,5 \div 1,0$	0-1,5
Полугидроморфный	Грунтовые воды активно участвуют в питании растений, преобладавая над оросительной	$-\bar{n} \geq 0,3 \Sigma (u + T_p) - 0c$ $M \geq 2,0$	0,5-3,0
Гидроморфный	Питание растений в основном происходит за счет грунтовых вод	$-\bar{n} \geq 0,8 \Sigma (u + T_p) - 0c$ $M \geq 5,0$	3,0-7,0

расход воды на непроизводительное испарение. Поэтому затраты воды при общем балансе следует добавлять непроизводительные потери воды на повышенное испарение из грунтовых вод.

Величина испарения из грунтовых вод тесно связана с величиной мелиоративной части водопотребления M . Эту величину следует определить, как то количество воды, которое необходимо добавить к оросительной норме, чтобы вымыть накопившиеся в процессе подпитывания из грунтовых вод соли. Если минерализация грунтовых вод составляет $C_{сб}$, то в результате непроизводительного испарения из них в активном слое будет накоплено количество солей, равное

$$\Delta S_s = C_{сб} \cdot \Delta \Pi. \quad (8)$$

Для вымывания этих солей потребуются количество воды $-M$, которое согласно выражению, полученному В.Р.Волобуевым

(1967), равно или больше

$$\mu > \alpha \lg \frac{S_n}{S_0} = \alpha \lg \left(1 + \frac{S_i}{S_0} \right) = \alpha \lg \left(1 + \frac{C_2 \rho \Delta \Pi}{S_0} \right). \quad (9)$$

Если S_0 заменить допустимым содержанием в зоне аэрации для различных типов засоления и условий, то можно получить для них количество воды, затрачиваемое на удаление солей, накопленных в результате непродуктивного испарения из грунтовых вод. На рис. 1 показаны результаты расчетов для Голодной степи по данным НИПТО (Ганиев); при этом α по Волобуеву — 1,22.

В результате получается, что хотя гидроморфный и полугидроморфный режимы позволяют использовать дополнительное количество воды из грунтовых вод, накапливающиеся при этом соли требуют для своего вымыва большее количество воды, чем до этого нам удалось сэкономить.

На рис. 2 приведены кривые сравнения различных мелиоративных режимов, проведенные нами для Голодной степи, исходя из минерализации грунтовых вод 6–8 г/л для эксплуатационного периода, а также аналогичные кривые по данным И.П. Айдарова (выполненные по методике С.Ф. Аверьянова) для Каршинской степи и Канибадамского массива с нашими поправками на водопотребление при автоморфном режиме. При автоморфном режиме нами (В.А. Духовный, 1973) получено эмпирическое уравнение увеличения водопотребления за счет инфильтрации (— Π) в зависимости от уровня грунтовых вод (H):

$$K = \frac{M_0 + \Pi}{M_0} = 0.645 \cdot H^{0.234}. \quad (10)$$

Итак, наиболее выгодным с мелиоративной точки зрения для большинства районов, подверженных или склонных к засолению, является полуавтоморфный режим. Гидроморфный и полугидроморфный режимы могут быть с успехом применены в условиях пресных напорных грунтовых вод, например, в зоне затопляемых или ограждаемых первых террас рек. Автоморфный режим следует поддерживать при естественно дренированных массивах или возможности сохранить глубокий уровень грунтовых вод дождеванием, подпочвенным орошением в сочетании с вертикальным дренажем.

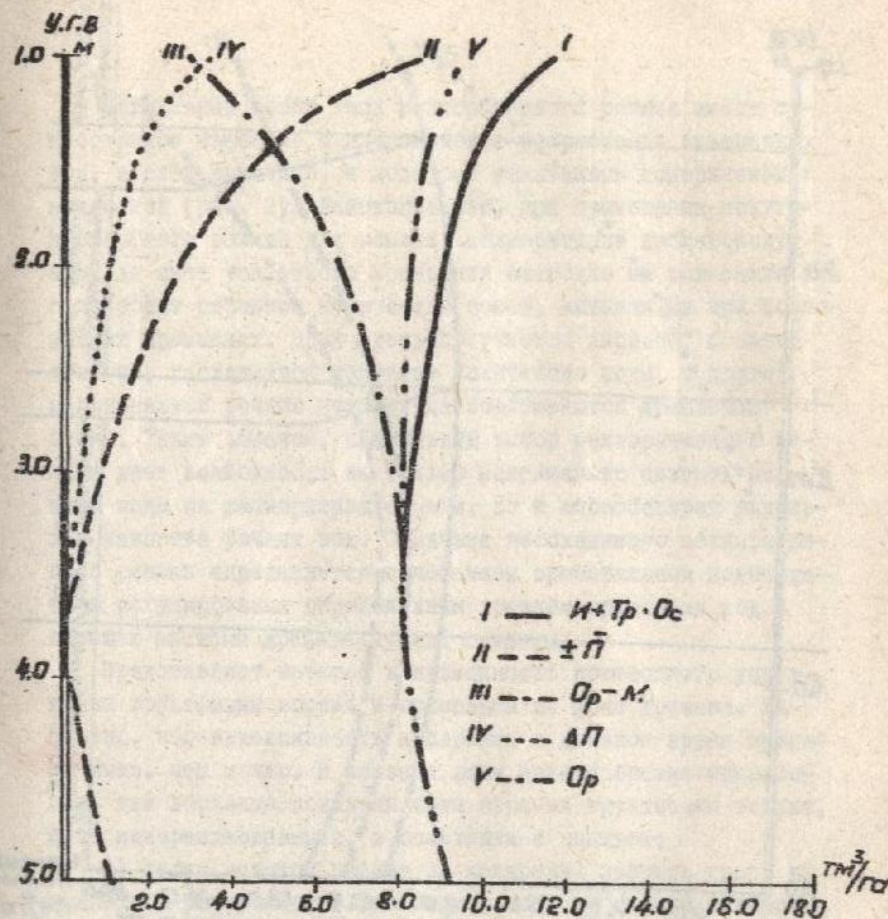


Рис. 1. Сравнительные зависимости оросительных норм, суммарного водопотребления и их элементов для Голодной степи при $C_{ср} = 7$ г/л

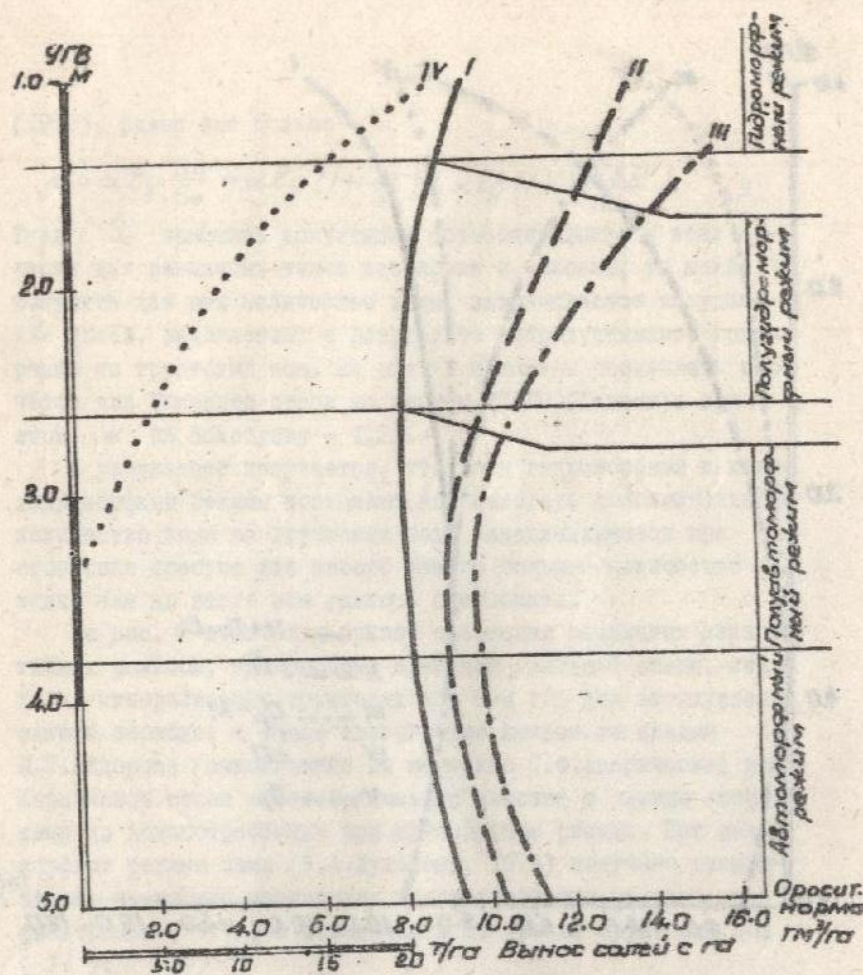


Рис. 2. Зависимость оросительных норм от различных мелиоративных режимов и влияние их на загрязнение стока рек; I — оросительные нормы для Голодной степи; II — то же для Каршинской степи (И. П. Айдаров); III — то же для Канибадамского массива (И. П. Айдаров, Э. К. Каримов); IV — вынос солей с га по Голодной степи.

Правильный выбор типа мелиоративного режима имеет существенное значение и для снижения загрязнения возвратных вод, а следовательно, и воды рек повышенным содержанием в них солей (рис. 2). Действительно, при применении полугидроморфного режима для земель, мелиоративно неблагоприятных, за счет усиленного испарения ежегодно мы вовлекали в солеоборот огромное количество солей, вымывая их при последующих промывках. Вред здесь получается двойной: с одной стороны, расходуется излишнее количество воды, с другой — загрязняются речные воды, куда сбрасываются дренажные стоки. Таким образом, правильный выбор мелиоративного режима дает возможность не только максимально снизить расходы воды на мелиоративные цели, но и способствует улучшению качества речных вод. Создание необходимого мелиоративного режима определяется сочетанием оросительной водоподачи и регулирования определенным уровнем грунтовых вод с помощью системы дренажа нужной глубины.

Представляет интерес и возможность совместного управления грунтовыми водами и орошением на фоне дренажа. Известно, что интенсивность испарения в дневное время намного выше, чем ночью. В связи с этим целесообразно попробовать два варианта подпитки зоны аэрации грунтовыми водами, даже минерализованными, в сочетании с поливом:

а) перед началом полива на междурядья закрыть дренаж и поднять с вечера грунтовые воды, чтобы до начала интенсивного испарения утром начать полив. Затем перед концом полива грунтовые воды опускать и недопускать миграции солей вверх;

б) ежедневно поднимать грунтовые воды ночью и "срабатывать" их с утра, т.е. мы достигнем увлажнения зоны аэрации и не допустим подтяжки солей, так как оросительные промывки будут "срабатывать" соли вниз.

Переходя к вопросу о реальном водопотреблении, необходимо принимать мелиоративное состояние земель и состояние мелиоративной системы "статус кво". Одновременно при установлении величины реального водопотребления, кроме водопотребления нетто, должны быть учтены потери воды.

Потери воды складываются из потерь на поле на просачивание ниже корнеобитаемого слоя, испарение с поверхности борозд и сбросы с полей; а также потерь в междолевой и внутрихозяйственной сети при транспортировке воды на фильтрацию, испарение и сбросы. Учет потерь каждого вида производится с помощью коэффициентов полезного действия, соответственно, поля ($KPD_{пл}$), междолевой сети ($KPD_{мкс}$) и внутрихозяйственной сети ($KPD_{вх}$). Последние два КПД, будучи перемноженными, характеризуют КПД системы (KPD_c).

Поэтому в общем случае оросительная норма брутто должна быть равна:

$$O_{pг} = \frac{\sum (U + T_p) - Q_c \pm \Pi + M}{KPD_{пл} \times KPD_c} \quad (II)$$

Данное выражение должно быть несколько скорректировано. Во-первых, часть оросительной нормы вносится в вегетационный период, часть во вневегетационный. Во вневегетационный период производится большая часть промывок, а также влагозарядка. КПД поля и системы во вневегетационный и вегетационный период разные. Обычно во вневегетационный период КПД системы значительно меньше. Кроме того, часть потерь на поле, а именно та часть оросительной нормы, которая идет на просачивание ниже корнеобитаемого слоя, по сути идет на создание промывного режима, т.е. на нее должна быть уменьшена величина μ . Тогда оросительная норма составит:

$$O_{pг} = \frac{[\sum (U + T_p) - Q_c \pm \Pi] (1 - \eta_{пр}) + \mu}{KPD_{пл} \times KPD_c} \quad (I2)$$

($\eta_{пр}$ — доля потерь на просачивание по методике Н.Т.Лактаева). Эта величина оросительной нормы должна быть разбита на две части — на вегетационную и не вегетационную. Часть мелиоративной доли вносится в виде промывного режима орошения, часть в виде специальных промывок:

$$O_{pг}' = O_{pгв} + O_{pгнв};$$

$$O_{pг} = \frac{O_{pгв}}{KPD_{плгв} \times KPD_{сгв}} + \frac{O_{pгнв}}{KPD_{плнв} \times KPD_{снв}} \quad (I3)$$

Учитывая значительное различие в коэффициентах полезного действия системы в вегетационный и не вегетационный периоды, необходимо наметить определенные принципы назначения не вегетационных поливов и выбора их доли в общем водопотреблении.

Не вегетационные поливы необходимы в следующих случаях:

а) если суммарное испарение во вневегетационный период больше, чем осадки, и запасов почвенной влаги для получения надежных всходов недостаточно;

б) если промывной режим, созданный в вегетационный период, не может обеспечить подачу необходимой части нормы " μ " для поддержания мелиоративного состояния.

Исходя из изложенного выше, представляется целесообразным развить комплекс исследований, который бы позволил установить:

- обоснованные нормы водопотребления с учетом всех факторов, формирующих и влияющих на него;
- оптимальный мелиоративный режим для различных природно-мелиоративных зон Средней Азии;
- критерии удовлетворения водопотребления в годы водного дефицита различного уровня и отсюда принципы водodelения в водоограниченных бассейнах.

Намеченные исследования должны для каждой климатической зоны и типовых мелиоративных условий установить:

- величину суммарного испарения;
- величину дополнительного испарения в зависимости от изменения уровня грунтовых вод, так как имеющиеся данные НПО и других институтов для одних и тех же условий резко отличаются;
- параметры влаго- и солепереноса, а также прогноз изменения минерализации грунтовых вод;
- коэффициенты техники полива и КПД систем для различных районов и систем.

Эти данные должны быть получены на эталонных водно-балансовых станциях или участках. Кроме того, специально поставленными исследованиями необходимо выяснить такие вопро-

сы, как:

- влияние отклонений от оптимальной агротехники на величину суммарного испарения;
- изменение водопотребления при увеличении минерализации оросительной воды;
- водопотребление на новых землях.