

Мелиорация и рекультивация, экология

УДК 502/504:631.6

А. И. Голованов, доктор техн. наук, профессор

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Московский государственный университет природообустройства»

ВОДООБМЕН И ОРОСИТЕЛЬНЫЕ НОРМЫ

Приведены результаты расчетов на модели, позволившие выявить основные факторы, влияющие на водообмен, построить номограммы для расчета влагообмена и оросительных норм в различных по влагообеспеченности зонах.

There are given results of calculations on the model making it possible to find the main factors influencing water exchange, to build monograms for calculation of moisture exchange and irrigation rates in the zones which are different on moisture availability.

Под водообменом понимают вертикальные потоки влаги между корнеобитаемым слоем почвы и подстилающими его слоями, в данной статье восходящие потоки влаги обозначены как положительные (капиллярное подпитывание), а нисходящие (промываемость почвы) — как отрицательные.

Водообмен играет решающую роль в почвообразовательном процессе, определяет нагрузку на грунтовые воды, в том числе и химическую, формирует количество и состав дренажных вод, загрязнение рек. От водообмена зависит размер оросительных норм. При большой промываемости почва обедняется питательными веществами, илистой фракцией; в гумидной зоне формируются бедные подзолистые почвы, в

умеренной — солоди; но почва при этом освобождается от избыточной влаги (осушается); а в аридной зоне засоленные почвы освобождаются от избытка солей. Восходящие токи влаги способствуют увлажнению почвы, иногда ведут к заболачиванию, уменьшают потребность в орошении, но если грунтовые воды минерализованные, происходит засоление почв.

Водообмен измеряют с помощью лизиметров, в которых надо поддерживать тот же ход глубин грунтовых вод, что и на окружающем поле (это наиболее надежный способ). При глубоких грунтовых водах лизиметрические наблюдения организовать сложно, так как нельзя разрывать гидродинамическую связь в водяном теле почвы и грунта.

Надо помнить, что истечение влаги из почвы в атмосферу искажает процесс, поэтому использовать короткие монолиты (типа испарителей ГГИ-500) нельзя, так как они заметно уменьшают объем вытекающей из них воды.

Существующие теоретические формулы, полученные путем решения линейаризованного уравнения влагопереноса (например, Ю. Н. Никольским), не дают точных результатов. Самым надежным является моделирование процессов влагообмена, основанное на учете наибольшего числа факторов.

В данной работе приведены результаты большого числа расчетов на модели, позволившие выявить основные факторы, влияющие на водообмен, построить номограммы для расчета влагообмена и оросительных норм.

Отсутствие простых способов расчета заставляет многих авторов, разрабатывающих методы расчета режима орошения и размеров оросительных вод, пренебрегать водообменом (например, Н. В. Данильченко, чьи расчеты вошли в справочные руководства и в зональные рекомендации по режиму орошения), принимать в расчет возможное капиллярное подпитывание, которое в засушливых районах из-за больших глубин грунтовых вод встречается или, по крайней мере, должно встречаться редко, а реальный сброс части осадков и поливных вод совершенно не учитывается.

В зоне неустойчивого увлажнения (степные районы России) даже без орошения наблюдается устойчивый речной сток в межень, следовательно, промываемость почвы находится в пределах 20...60 мм/год и более (табл. 1).

Таблица 1

Среднемноголетние величины местного годового слоя стока, стока весеннего половодья и межени (по картам изолиний стока 1986 г.)

Природная зона	Местоположение	Норма годового местного речного стока, мм	Норма слоя весеннего половодья, мм	Норма межненного стока, мм
Лесостепь	Тула	175	95	80
Степь	Орел	158	86	72
	Курск	126	70	56
Сухая степь	Воронеж	114	60	54
	Саратов	57	38	19
	Ставрополь	57	8	49
	Котельниково	32	15	17
Полупустыня	Палласовка	16	10	6

На поливных землях (на фоне большего, чем естественное, увлажнения почв) дополнительная промываемость почвы при неаккуратных поливах может составить примерно ту же величину. Отсюда повсеместный подъем уровней грунтовых вод на орошаемых землях и их вторичное засоление.

Пренебрегать водообменом в расчетах режима орошения категорически нельзя. Надо объективно его оценивать и искать приемы уменьшения. Одним из самых эффективных способов уменьшения нисходящих токов влаги при орошении является минимизация величины предполивной влажности почвы, которая еще не вызывает

существенного (более 5...10 %) снижения урожайности. Этому же способствует уменьшение поливных норм, улучшение качества дождя.

Водообмен зависит от множества факторов: водно-физических свойств почв — пористости, максимальной гигроскопичности, высоты капиллярного подпитывания, предельной полевой влагоемкости. Особо надо отметить способ определения коэффициента фильтрации верхних слоев почвы, так как при дождевании вода впитывается только по порам микроагрегатов (крупные поры, трещины при этом не задействованы). Такой коэффициент фильтрации называют матричным. Его нельзя оп-

ределять наливом на площадки или в кольца, поскольку во многом коэффициент фильтрации обусловлен проницаемостью крупных пор и трещин, т.е. его величина существенно завышается. При изысканиях целесообразно организовывать опытное дождевание разной интенсивности и по времени начала поверхностного стока t_{CT} (или образования луж на поверхности почвы) вычислять величину матричного коэффициента фильтрации, используя для этого формулу А. И. Голованова:

$$t_{CT} = \frac{\pi \psi_0^2}{4\lambda(q/k(\omega_r) - 1)^2}; \quad (1)$$

$$\lambda = k(\omega_r)/C(\omega_r), \quad (2)$$

где начальный капиллярный напор

$$\psi_0 = -\mu h_k \ln \left(\frac{m - \omega_M}{\omega_0 - \omega_M} \right); \quad (3)$$

расчетная влажность почвы

$$\omega_r = \omega_0 + 0,56(m - \omega_0); \quad (4)$$

расчетный коэффициент влагопроводности

$$k(\omega_r) = k_M \left(\frac{\omega_r - \omega_M}{m - \omega_M} \right)^5; \quad (5)$$

расчетный коэффициент влагоемкости

$$C(\omega_r) = \frac{\partial \omega}{\partial H} = \frac{\partial \omega}{\partial \psi} = \frac{\omega_r - \omega_M}{\mu h_k}; \quad (6)$$

m — пористость; ω_M — максимальная гигроскопичность; ω_0 — начальная влажность почвы; h_k — высота капиллярного подъема, м; μ — эм-

пирический коэффициент, принят равным 1; k_M — матричный коэффициент фильтрации, м/сут; q — интенсивность дождевания, м/сут.

Величина и направление водообмена во многом зависят от глубины грунтовых вод и от предполивной влажности $\bar{\omega}_{III}$. Это позволяет построить серию номограмм при базовом коэффициенте фильтрации $k_M = 0,15$ м/сут и базовой продолжительности вегетационного периода $T_{вер} = 130$ сут.

Номограммы построены для разных значений дефицита естественного увлажнения теплого периода (разность между испаряемостью и осадками): 700; 550; 400 и 250 мм (рис. 1...4). Эти величины дефицита естественного влагообеспечения примерно соответствуют полупустынной зоне, сухим степям, степной зоне и зоне лесостепей. По оси ординат отложены величины $\bar{h}_r = (h_r - 0,7h_{кoc})/h_k$, где h_r — средняя за вегетацию глубина грунтовых вод, м; $h_{кoc}$ — средняя толщина корнеобитаемого слоя, м; цифры у кривых — это относительные величины предполивной влажности:

$$\bar{\omega} = (\omega_{III} - \omega_M)/(p - \omega_M). \quad (7)$$

При расчете номограмм принято, что относительной предполивной влажности $\bar{\omega}$ примерно соответствуют сле-

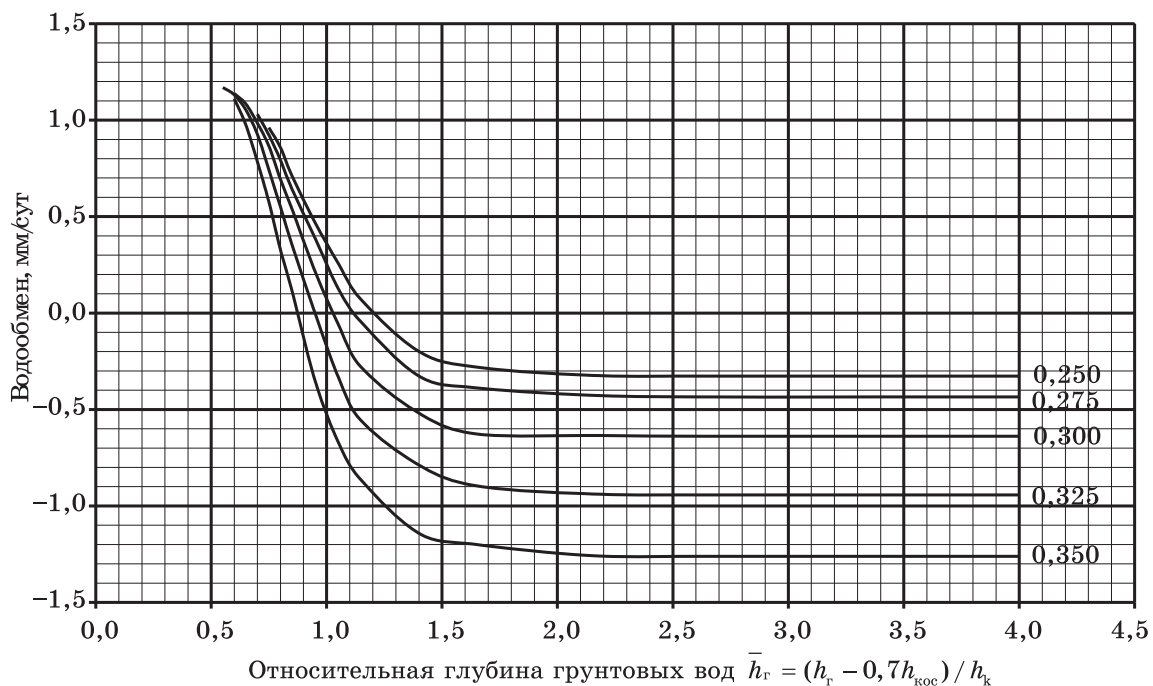


Рис. 1. Базовый водообмен g_0 , мм/сут, при дефиците увлажнения 250 мм ($k_M = 0,15$ м/сут, продолжительность вегетационного периода $T_{вер} = 130$ сут), цифры у кривых — относительные значения предполивной влажности $\bar{\omega}$

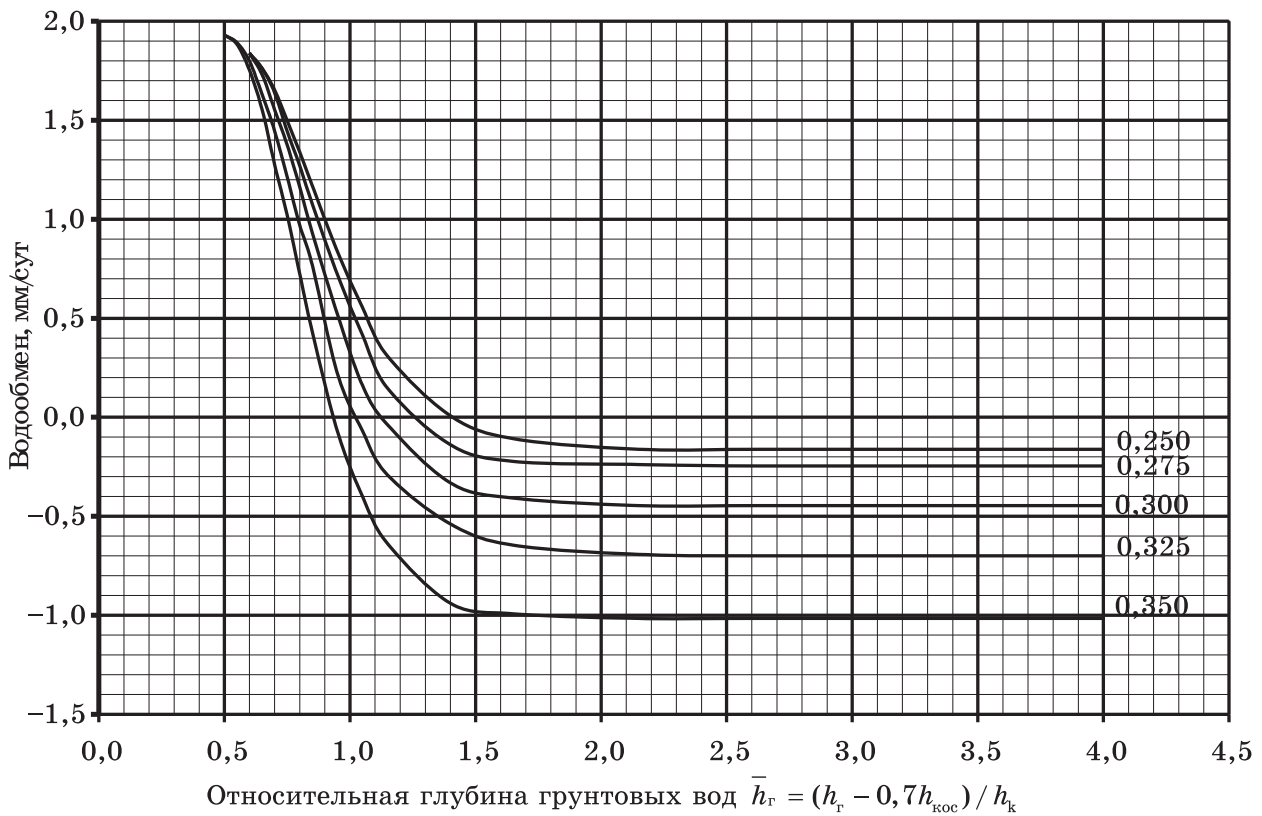


Рис. 2. Базовый водообмен g_0 , мм/сут, при дефиците увлажнения 400 мм ($k_M = 0,15$ м/сут, продолжительность вегетационного периода $T_{\text{вег}} = 130$ сут), цифры у кривых — относительные значения предполивной влажности $\bar{\omega}$

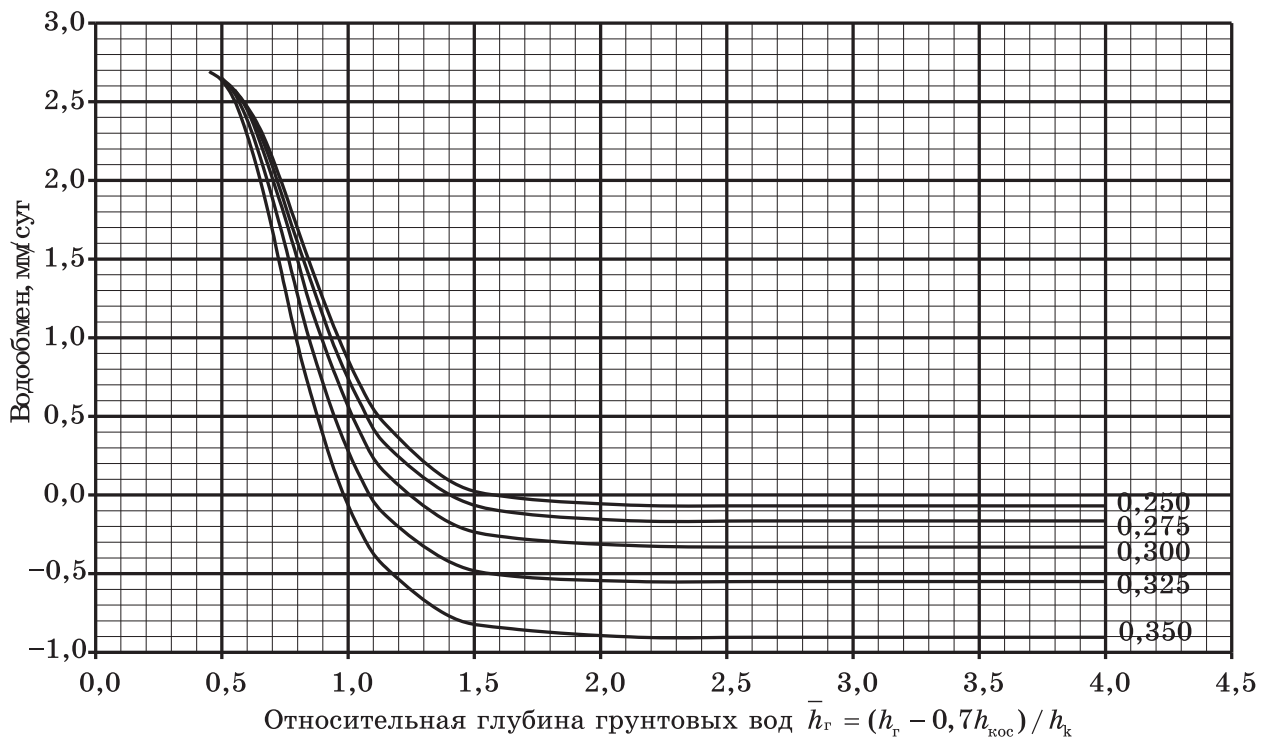


Рис. 3. Базовый водообмен g_0 , мм/сут, при дефиците увлажнения 550 мм ($k_M = 0,15$ м/сут, продолжительность вегетационного периода $T_{\text{вег}} = 130$ сут), цифры у кривых — относительные значения предполивной влажности $\bar{\omega}$

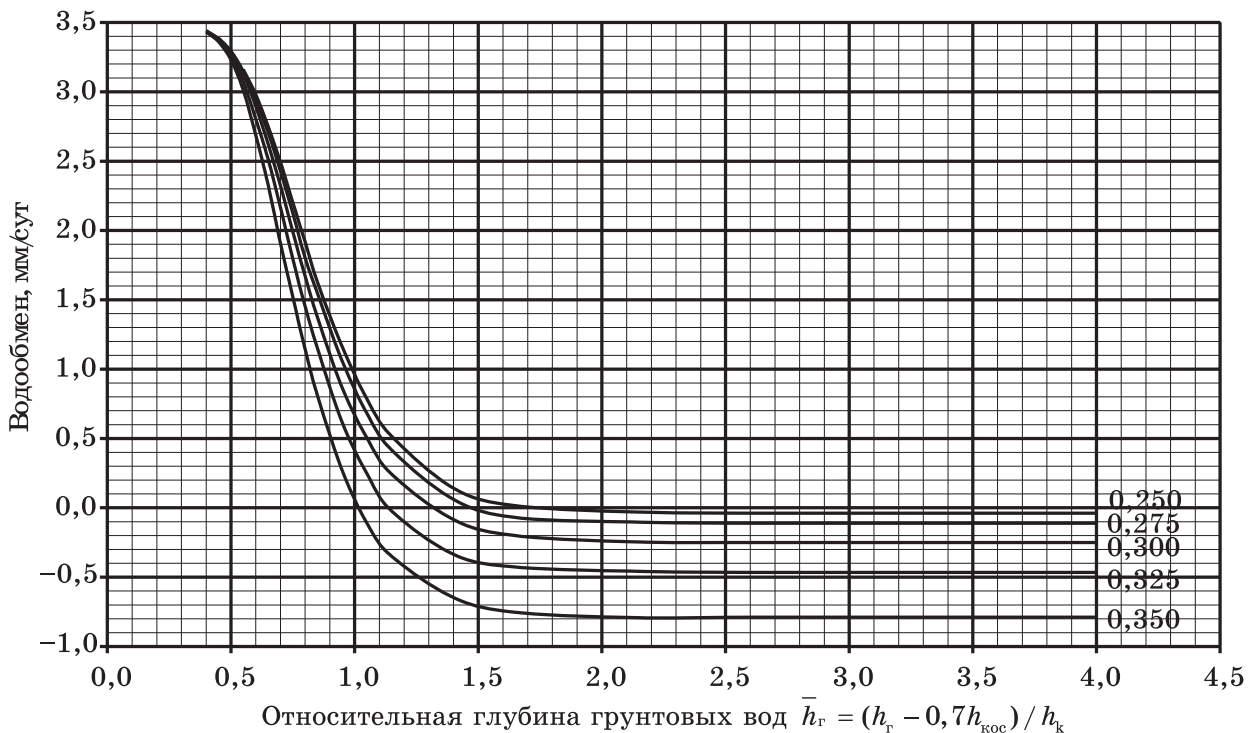


Рис. 4. Базовый водообмен g_0 , мм/сут, при дефиците увлажнения 700 мм ($k_M = 0,15$ м/сут, продолжительность вегетационного периода $T_{вер} = 130$ сут), цифры у кривых — относительные значения предполивной влажности $\bar{\omega}$

дующие величины влажности в долях от предельной полевой влагоемкости (ППВ):

$\bar{\omega}$	доли ППВ
0,250	0,615
0,275	0,645
0,300	0,675
0,325	0,710
0,350	0,740

Приведенные номограммы показывают существенную зависимость водообмена от предполивной влажности, которая является мощным фактором его регулирования. Назначение этой величины является типичной технико-эколого-экономической задачей, оптимизирующей затраты на орошение, прибыль от прибавки урожая и затраты на компенсацию ущерба окружающей среде (обеднение почвы гумусом и питательными веществами, строительство дренажа, загрязнение рек дренажными водами и т. п.). Вторым мощным фактором, определяющим не только величину, но и направление водообмена, как известно, является глубина грунтовых вод.

С помощью номограмм можно определить так называемое базовое значение водообмена g_0 , выраженное в мил-

лиметрах за сутки, при матричном коэффициенте фильтрации 0,15 м/сут и при длительности вегетационного периода 130 сут (при капиллярном подпитывании корнеобитаемого слоя $g > 0$ и нисходящих токах влаги $g < 0$).

Переход к другому коэффициенту фильтрации осуществляется по формуле $g_k = g_0(k_M/0,15)^{0,5}$, (8) где k_M — среднее значение матричного коэффициента фильтрации во всей зоне аэрации.

Возможность аппроксимации формулой (8) проверена благодаря моделированию долговременных (40 лет) периодов орошения при разных условиях (рис. 5).

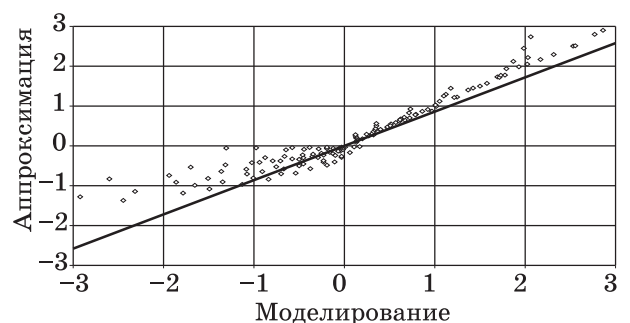


Рис. 5. Сравнение водообмена за вегетацию, мм/сут, по результатам моделирования и по аппроксимации (3) в диапазоне значений матричного коэффициента фильтрации 0,05...0,5 м/сут

Влияние на водообмен продолжительности вегетации, отличной от 130 сут, рассчитывают по формуле

$$g_{T_{\text{вег}}} = g_0 (T_{\text{вег}}/130)^{0,25}. \quad (9)$$

Оценка этой аппроксимации приведена на рис. 6.

Коэффициент фильтрации и продолжительность вегетации можно учесть, соединив формулы (8) и (9):

$$g_k^T = g_0 (k_f/0,15)^{0,5} (T_{\text{вег}}/130)^{0,25}. \quad (10)$$

Водообмен за год отличается от водообмена за вегетационный период:

$$g_{\text{год}} = 0,36 g_k^T (365/T_{\text{вег}})^{0,25} - 0,1. \quad (11)$$

Оценка этой аппроксимации приведена на рис. 7.

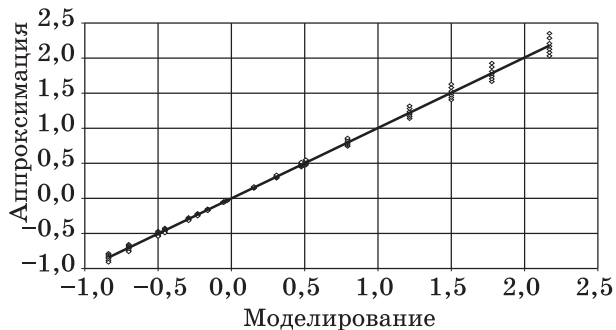


Рис. 6. Сравнение водообмена за вегетацию, мм/сут, по результатам моделирования и по аппроксимации (4) в диапазоне значений продолжительности вегетации $T_{\text{вег}}$ 100...180 сут

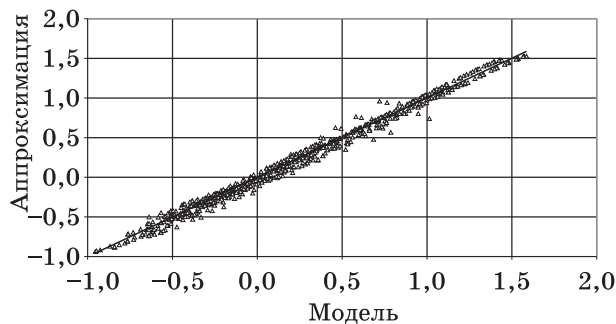


Рис. 7. Сравнение водообмена за год, мм/сут, по результатам моделирования и по аппроксимации (6) в диапазоне значений продолжительности вегетационного периода $T_{\text{вег}}$ 100...180 сут

Пример. Рассчитать среднегодовой водообмен при следующих показателях: дефицит увлажнения — 400 мм; продолжительность вегетации $T_{\text{вег}} = 150$ сут; пористость $p = 0,5$; максимальная гигроскопичность $\omega_M = 0,1$; высота капиллярной каймы $h_k = 2,2$ м; матричный коэффициент фильтрации $k_M =$

0,1 м/сут; предельная полевая влагоемкость (ППВ) = 0,65 пористости; предполивная влажность — 0,65ППВ, или $0,65 \cdot 0,65 \cdot 0,5 = 0,211$ объема; толщина корнеобитаемого слоя $h_{\text{кос}} = 0,8$ м; глубина грунтовых вод $h_r = 3$ м. Относительная предполивная влажность $\bar{\omega} = (0,211 - 0,1)/(0,5 - 0,1) = 0,278$; относительная глубина грунтовых вод $\bar{h}_r = (3 - 0,7 \cdot 0,8)/2,2 = 1,11$.

По номограмме на рис. 2 находим базовый водообмен: при коэффициенте фильтрации 0,15 м/сут и продолжительности вегетации 130 сут $g_0 = 0,21$ мм/сут (положительная величина свидетельствует о капиллярном подпитывании). Для перехода к заданному коэффициенту фильтрации 0,1 м/сут и продолжительности вегетации 150 сут воспользуемся формулой (5):

$$g_k^T = 0,21 (0,10/0,15)^{0,5} (150/130)^{0,25} = 0,177 \text{ мм/сут},$$

или за вегетацию базовый водообмен составит $0,177 \cdot 150 = 27$ мм. Моделирование дает примерно ту же величину капиллярного подпитывания — 26 мм. При таком режиме поливов наблюдается некоторое подпитывание корнеобитаемого слоя грунтовыми водами и в случае их высокой минерализации возможно вторичное засоление. Среднегодовой водообмен оценим по формуле (6): $g_{\text{год}} = 0,36 \cdot 0,177 \cdot (150/365)^{0,25} - 0,1 = 0,049$ мм/сут, или $-0,0049 \cdot 365 = -18$ мм в год.

По данным моделирования он составил -20 мм/год, т. е. за год наблюдается небольшая промываемость почвы, что компенсирует соленакопление за период вегетации.

Из номограммы следует, что при относительной глубине грунтовых вод 1,25, а абсолютной $1,25 \cdot 2,2 + 0,7 \cdot 0,8 = 3,28$ м водообмен в среднем за многолетие нулевой, т. е. скомпенсированный — сумма восходящих токов равна сумме нисходящих (рис. 2). При моделировании эта глубина составила 3,2 м, что практически совпадает с номограммой. Среднегодовой водообмен

при такой глубине грунтовых вод по формуле (6) равен $-0,1 \cdot 365 = -37$ мм/год, а по результатам моделирования -28 мм/год.

При глубоких грунтовых водах (более 5...6 м) нисходящие токи влаги достигают максимума и из номограмм следует, что при $\bar{\omega} = 0,278$ (рис. 2), т. е. при невысокой предполивной влажности — 0,65ППВ базовый водообмен за вегетацию $g_0 = -0,25$ мм/сут, а приведенный к данным условиям $g_k^T = -0,21$ мм/сут, или $-0,21 \cdot 150 = -32$ мм за вегетацию, по данным моделирования -38 мм. Годовой водообмен по формуле (11) равен $-0,21 \cdot 0,36 \cdot (365/150)^{0,25} - 0,1 = -0,195 \cdot 365 = -71$ мм, а по данным моделирования он равен -81 мм. При поливе более влаголюбивых культур, например, при предполивной влажности 0,7ППВ, или $\bar{\omega} = 0,318$, промываемость почвы за вегетацию возрастает до $g_k^T = -0,6 \cdot (0,10/0,15)^{0,5} \cdot (150/130)^{0,25} = 0,5$ мм/сут, или -75 мм, т.е. в 2,3 раза; годовой водообмен возрастает в меньшей степени: до -119 мм, или в 1,7 раза.

Из номограмм следует, что при подъеме уровня грунтовых вод резко увеличивается капиллярное подпитывание, которое в диапазоне относительных глубин грунтовых вод 0,5...1 рас-

тет по нелинейному закону. На это указывали С. Ф. Аверьянов, С. И. Харченко, Б. С. Маслов, Н. В. Данильченко и др. Максимально возможное капиллярное подпитывание в основном определяется дефицитом атмосферного увлажнения. Для базовых условий по номограммам находим (рис. 1...4):

Дефицит, мм	Подпитывание за 130 сут, мм
150	77
200	118
250	134
400	250
550	350
700	440

Подпитывание возможно только при пополнении грунтовых вод на орошаемом массиве за счет фильтрационных потерь воды из оросительной сети или за счет притока извне. Варианты приведенного выше подпитывания могут быть обеспечены редко.

Из анализа номограмм следует: с ростом дефицита естественного увлажнения промываемость почвы (когда $g_0 < 0$) на орошаемых землях в абсолютных значениях уменьшается. При глубоких грунтовых водах и низкой предполивной влажности (0,65ППВ) ее значения для базового варианта представлены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость промываемости почвы от дефицита атмосферного увлажнения

Дефицит атмосферного увлажнения, мм	Водообмен при орошении, мм		Водообмен без орошения, мм
	За вегетацию (130 сут)	За год	За год
150	-96	-138	-74
200	-81	-136	-68
250	-56	-135	-65
400	-32	-86	-16
550	-22	-58	-11
700	-14	-42	-7

Уменьшение промываемости с ростом дефицита объясняется большей засушливостью территории и ростом испарения.

На рис. 8...11 приведены номограммы для определения базовых значений оросительных норм при матричном коэффициенте фильтрации 0,15 м/сут и продолжительности вегетационного периода 130 сут (базовый вариант).

Величины оросительных норм при глубоких грунтовых водах при-

ведены в табл. 3, в которой также показан вклад нисходящих токов влаги в оросительную норму. В засушливых степях и полупустынях он составляет примерно 10...15 % оросительной нормы. В более влажных зонах естественная промываемость гораздо больше, она примерно соответствует модулю подземного питания рек, орошение здесь проводят на фоне большей естественной увлажненности, и поэтому

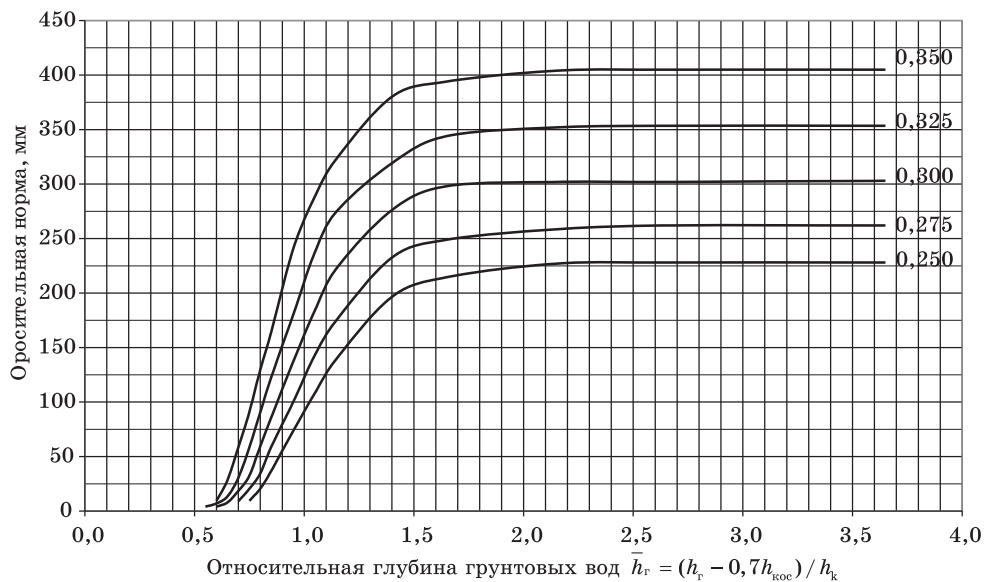


Рис. 8. Оросительная норма при дефиците естественного увлажнения 250 мм, цифры у кривых — относительные значения предполивной влажности $\bar{\omega}$

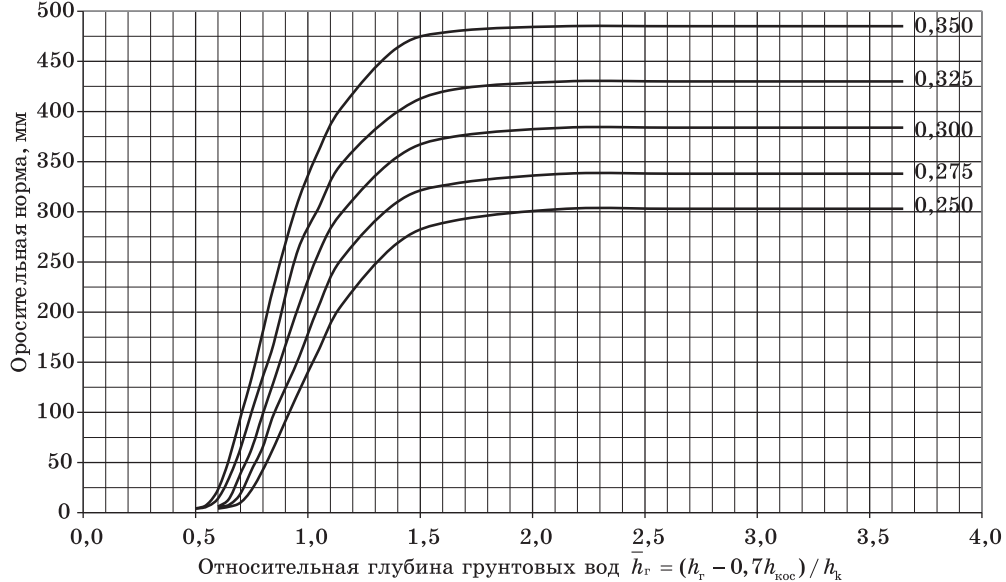


Рис. 9. Оросительная норма при дефиците естественного увлажнения 400 мм, цифры у кривых — относительные значения предполивной влажности $\bar{\omega}$

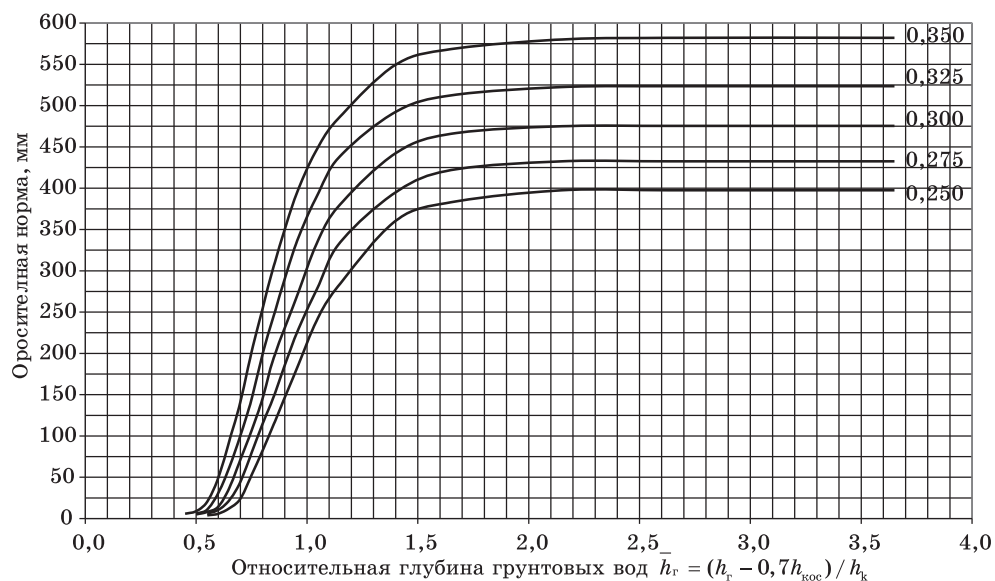


Рис. 10. Оросительная норма при дефиците естественного увлажнения 550 мм, цифры у кривых — относительные значения предполивной влажности $\bar{\omega}$

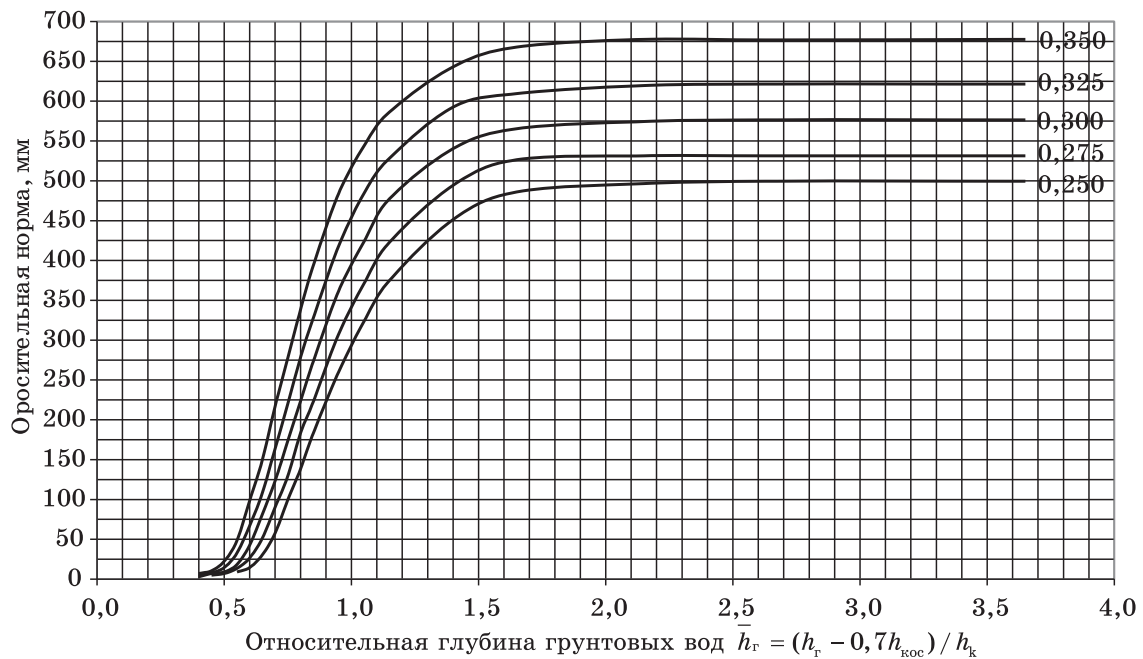


Рис. 11. Оросительная норма при дефиците естественного увлажнения 700 мм, цифры у кривых — относительные значения предполивной влажности $\bar{\omega}$

значительная часть поливных вод просачивается вниз.

Это малоизвестное обстоятельство, усложняющее орошение в лесостепи и в северной части степной зоны (с дефицитом атмосферного увлажнения меньше 250 мм за теплый период). Призывы поливать здесь осторожно, «лишь в дополнение к атмосферным осадкам», остаются только призывами. Регулярное орошение в этих зонах представляется ненужным не только из-за больших капитальных затрат и небольшой

прибавки урожая, но и из-за расходования пресной воды на глубинное просачивание (около 30...40 % оросительной нормы нетто, т. е. без учета фильтрационных потерь из сети), значительного питания подземных вод и подъема их уровня, особенно в основании склонов. Регулярное орошение в лесостепи и северной части степной зоны должно быть заменено водосберегающими технологиями земледелия, одновременно выполняющими природоохранные функции (борьба с водной эрозией).

Таблица 3

Базовые значения среднегодовых оросительных норм в зависимости от дефицита естественной увлажненности территории за теплый период (> 5 °С), предполивной влажности на фоне глубоких грунтовых вод

Дефицит естественного увлажнения, за теплый период, мм	Оросительная норма, мм, при предполивной влажности в долях ППВ				Промываемость за вегетацию и за год (полужирный шрифт), мм				Доля промываемости в оросительной норме			
	0,650	0,675	0,700	0,735	0,650	0,675	0,700	0,735	0,650	0,675	0,700	0,735
150	194	230	283	337	78	98	128	173	0,40	0,43	0,45	0,51
200	217	263	306	362	148	167	216	262	0,33	0,32	0,34	0,45
250	262	303	354	405	71	83	121	164	0,21	0,24	0,32	0,38
400	338	384	430	485	136	157	211	256	0,09	0,15	0,21	0,27
550	432	478	524	582	56	73	112	154	0,05	0,09	0,14	0,20
700	532	576	622	678	135	146	196	248	0,03	0,06	0,10	0,16
					86	120	158	207				
					22	43	72	118				
					58	87	124	177				
					14	32	60	102				
					42	68	101	151				

Таблица 4

Годовая изменчивость (обеспеченность) базовых значений оросительных норм, мм, на фоне глубоких грунтовых вод (предполивная влажность — 0,65ППВ)

Обеспеченность, %	Дефицит 250 мм	Дефицит 400 мм	Дефицит 550 мм	Дефицит 700 мм
10	425	504	621	787
25	367	426	522	638
50	233	308	385	482
75	174	232	346	406
90	154	231	308	403
Среднее арифметическое	262	338	432	532

В табл. 4 приведены данные о годовой изменчивости (обеспеченности) размеров оросительных норм.

Орошение в этой природной зоне возможно на участках с неглубокими грунтовыми водами, например в поймах рек, обеспеченных хорошим дренажем, когда нисходящий водообмен резко сокращается и даже заменяется капил-

лярным подпитыванием, сокращающим оросительные нормы.

Ключевые слова: увлажнение почвы, годовой слой стока, неустойчивое увлажнение, капиллярное подпитывание, предполивная влажность почвы, коэффициент фильтрации, предельная поливная влагоемкость, глубина грунтовых вод, водообмен, водообмен при орошении почвы.

УДК 502/504: 631.459:631.67

Д. П. Гостищев, доктор техн. наук, профессор

Е. Ю. Гильденберг, соискатель

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

МЕРОПРИЯТИЯ ПО БОРЬБЕ С ЭРОЗИЕЙ ПОЧВ ПРИ ПОЛИВАХ ДОЖДЕВАНИЕМ

Приемы, повышающие структурность и водопрочность почв, ее водовместимость, противозерозионную стойкость территорий в целом, могут осуществляться в практике орошаемого земледелия различными машинами и механизмами. В зоне орошения черноземов и каштановых почв дождеванием изучены возможности почвоохранного применения машин и механизмов с пассивными, активными, комбинированными рабочими органами, специальные орудия для повышения поверхностной емкости поля. Анализ механического и агрегатного составов, водопрочности почв позволяет выделить почвоохранную роль поделки прерывистых борозд, при нанесении которых сохраняются глинистые фракции на полях, не снижается число мелких агрегатов, а количество водопрочных агрегатов закономерно возрастает.

The methods which increase the soil structure and water resistance, its water capacity, erosion resistance of the territories in the whole can be carried out in practice of the irrigated farming by different machines and mechanical devices. In the zone of the irrigated chernozem (black soil) and chestnut soil by sprinkling there are studied possibilities of soil protecting machines and mechanisms with passive, active, combined working elements, special instruments aiming at increasing the surface capacity of the field. The analysis of the mechanical and aggregate compositions, soil water resistance makes it possible to single out a soil protective role of making interrupted furrows, during which clay factions are remained in the fields, the number of small aggregates does not decrease and the number of water proof aggregates grows accordingly.

В орошаемой зоне черноземов и каштановых почв Северного Кавказа из 1,7 млн га земель, поливаемых различными способами, около 30 % располо-

жены на эрозионно-опасных уклонах. При орошении дождеванием эрозионные процессы и деградация почв сопутствуют поливам, о чем свидетельствует