С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университетінің **Ғылым жаршысы (пәнаралық)** = **Вестник науки** Казахского агротехнического университета им. С.Сейфуллина (**междисциплинарный**). - 2018. - №1 (96). - С.158-168

РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПРИ ДИСКРЕТНОМ ПОЛИВЕ ПО БОРОЗДАМ

Избасов Н.Б.

Аннотация

Поверхностное орошение, особенно полив по бороздам, используется больше, чем орошение с механическим подъемом воды (дождевание, внутрипочвенное, капельное) из-за низких затрат, более эффективных энергетических требований и лучшей аэрации корневой зоны. Проектирование, оценка и моделирование систем поверхностных орошений основывается на знании инфильтрационных свойств почвы и движения воды над полем.

Пространственное изменение скорости инфильтрации делает управление поверхностными ирригационными системами очень сложным процессом. Кроме того, параметры инфильтрации при бороздковом поливе могут изменяться из-за различной скорости движения, размеры борозды и исходном содержании воды в почве.

Нестационарный процесс движения воды по поверхности земли и впитывания ее в почву описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Для изучения динамики впитывания воды в почву и элементов поверхностного полива по бороздам при дискретной водоподаче использованы данные экспериментальных исследований по режиму увлажнения почвы. Путем анализа нестационарного движения воды по поверхности земли и впитывания ее в почву решено уравнение движения жидкости по бороздам.

Представлена модель движения воды в почве во время бороздкового полива с использованием уравнения Сен-Венана. Эта модель, характеризующая соответственно скорость впитывания воды с учетом глубины залегания грунтовых вод и начальную влажность почвы, дает информацию о положении увлажняющего фронта в почве со временем, что позволяет количественно определять количество воды, хранящейся в корневой зоне, и вычислять потери фильтрации в течение заданного временного интервала и относительно любой заданной глубины почвы.

Ключевые слова: способ полива, дискретный полив, модель, водоподача, скорость впитывания, коэффициент фильтрации, процесс, длина борозды, инфильтрация.

Введение

Поверхностный способ полива, в том числе полив по бороздам, широко использующийся полив сельскохозяйственных культур,наиболее распространенный во многих странах аридной зоны, требует дальнейшего совершенствования механизма увлажнения и распределения воды, с цельюразработки ресурсосберегающей технологии полива с высокой надежностью.

Несмотря на довольно продолжительный период существования бороздковогополива и большую вероятность его применения в ближайшей перспективе, обусловленную непродолжительной и малоэффективной практикой использования в аридной зоне других способов полива, — дождевания, внутрипочвенного, капельного - до сих пор нет единого мнения по составу элементов техники полива, а также нормативных критериев для оценки качества полива и современных агротехническихтребований на проведение бороздкового полива.

Исследования технологии полива с дискретной струей проведены И. Вырлевым[1]в Болгарии, Ю.Г. Безбородовым[2] в Узбекистане, Ш. Сатторовым [3] в Туркменистане, Ж.С. Мустафаевым [4]в Казахстане. Для определения наиболее рационального варианта полива предложен ряд моделей M.A. Tabuadaи др.[5,6], E.A. Holzapfel и др.[7], A. Rasoulzadeh,A.R. Sepaskhah [8],F. Sorousha, J.D. Fentonb [9], S. Sayari, M. Rahimpour, M. Zounemat-Kermani [10], и Ж.С. Мустафаевым [4,с.73-78] , на основе модели кинематической волны,которая предусматривает в период добегания изменение величинуы расхода, а доувлажнение проводят с уменьшенной постоянной струей с импульсами.

Практика показывает, что добегание поливных струй доконца борозды происходит неравномерно, для обеспечения более равномерного добегания поливальщики вынуждены несколько раз регулировать поливную струю, затрачивая на эту операцию тяжелый труд. Несмотря на это потеря воды на поверхностный сброс, инфильтрацию ниже корнеобитаемого слоя и испарение во время полива составляют порядка 50 - 70 % от общей поливной нормы.

Результаты исследования по совершенствованию технологии поверхностного полива в различных природно-климатических зонах показали, что в основу принципа разработки ресурсосберегающей технологии полива по бороздам, может быть принят принцип полива с прерывистой подачей воды в борозды [11-14].

Теоретические и методические принципы решения этой проблемы заключаются в том, что крупный поливной ток воды распределяется по поверхности орошаемого участка дискретным методом, то есть дробно, в несколько приемов с нормой добегания без сброса воды в конце участка, с формированным (неразмывающим) и регулируемым расходом до полного внесения расчетной поливной нормы, причем за предельно короткий промежуток времени, без учета увлажненности корнеобитаемого горизонта до требуемой глубины в момент производства полива. Это предъявляет более

высокие требования к автоматизированным и механизированным средствам, к мобильности и разрешающей способности их цикличной подачи постоянной и переменной струей с заданным расходом добегания.

Анализ существующих моделей дискретного полива по бороздам показал, что прерывистая, волновая, импульсная разновидности технологии дискретной подачи воды в борозды, основана на периодически повторяющейся многократной подаче воды в борозды импульсами заданной продолжительности (t_o), чередующимися с паузами (t_{na})

Материалы и методика исследований

Большое значение в практике дискретной технологии полива по бороздам имеют процессы передвижения почвенной влаги в насыщенных и ненасыщенных средах и изучение их

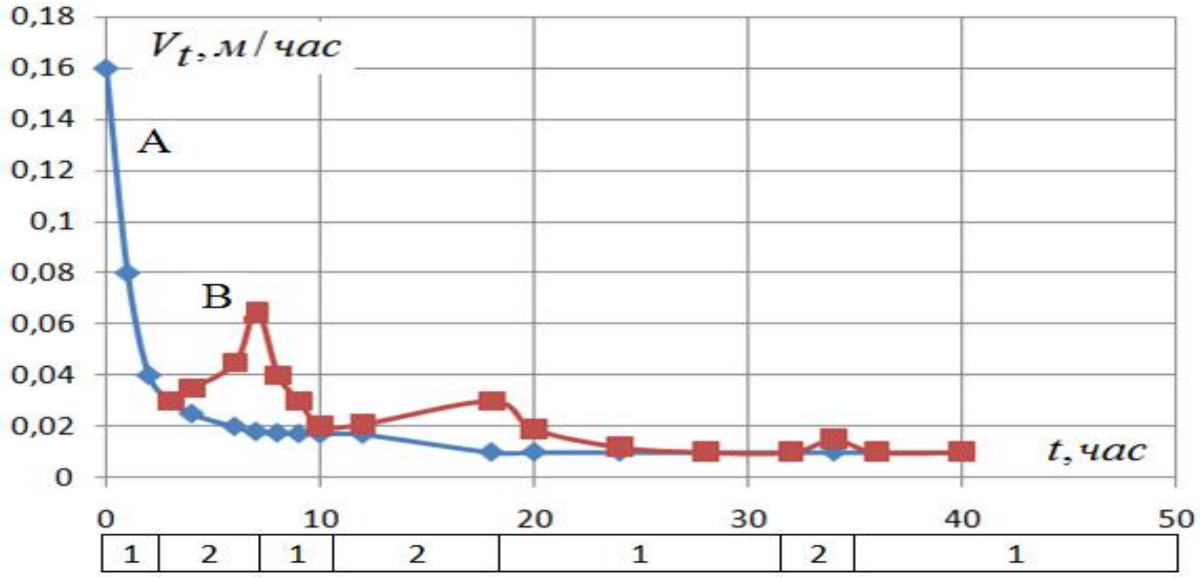
механизма проводилось постановкой специальных полевых опытовпо изучению скорости впитывания почвы при различных режимах водоподачипо разработанной схемев условиях Южного Казахстана на сероземных почвах (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнительная оценка скорости впитывания воды почвой при циклической подаче воды

Показатели	Продолжительность паузы, сут	Скорости впитывания воды в зависимости t, час			
		0.1	1.0	2.0	3.0
Первый импульс (V_1)	-	0.160	0.055	0.045	0.042
Второй импульс (V_2)	2.2	0.065	0.035	0.030	0.030
Третий импульс(V_3)	22.3	0.034	0.030	0.027	0.027
Отношение: (V_1 /V_2)		2.46	1.57	1.50	1.40
(V_1/ V_3)		4.70	1.83	1.66	1.55
(V_2/ V_3)		1.91	1.16	1.11	1.11

Для выявления характера изменения скорости впитывания при дискретной водоподаче в различных сочетаниях длительности и числа тактов был поставлен ряд опытов на метровом отрезке борозды, который показал, что с гидравлической точки зрения дискретная технология водоподачи является сложнейшим видом неустановившегося движения с перемещенным расходом воды вдоль пути. Здесь можно выделить движение воды с переменным сопротивлением по чередующимся циклам подачи и вертикальную инфильтрацию воды в почвогрунт. При этом особый интерес представляет процесс впитывания и перераспределения воды в почве при ее подаче после паузы.

Как видно из таблицы 1, скорость впитывания при третьем импульсе по сравнению с первым уменьшается в 4-5раз, по сравнению со вторым в 2 раза, ав дальнейшем – в 1,11 раза. Уменьшение скорости впитывания обусловлено образованием зоны временного насыщения на поверхности почвы, которая, медленно опускаясь вниз, сдавливает и увлекает за собой почвенный воздух, содержащийся в порах грунта. Следовательно, в третьем и последующих импульсах скорость впитывания приближается к коэффициенту фильтрации ($K_ф$), так как происходит полное насыщение верхнего слоя почвы (рисунок 1).



А- постоянная водоподача; В -прерывистая; 1-подача; 2-пауза.

Рисунок 1 - График зависимости скорости впитывания воды почвой от продолжительности водоподачи

Таким образом, можно сделать следующие выводы: во-первых, уменьшение скорости впитывания при дискретном поливе связано с образованием зоны временного насыщения в верхнем горизонте после первого импульса; во- вторых, после импульса в нижних горизонтах остается защемленный воздух, что затрудняет перемещение влаги на большую глубину при последующих импульсах.

При таком поливе в цикле подача-пауза наблюдается динамическая неустойчивость гидравлического процесса в почвогрунтах, то есть вертикальная инфильтрация осуществляется по затухающей кривой колебательного движения (рисунок 1).

Этот вид движения широко распространен и совершается за счет сил сопротивления - $F = -m(dx/dt)$ и восстановления - $R = -c \rangle x$.(где m– коэффициент сопротивления; dx/dt- скорость движения воды в мелиорируемой толще, м/час; c- коэффициент восстановления фильтрационных свойств почвы; x- длина борозды). Первая величина характеризуется трением воды вначале с почвенными частицами, а затем с водной пленкой, покрывающей частицы, а вторая – с обесструктурированием и набуханием почвы [14, с. 184-188]. Тогда

движение воды в почвенной толще будет описываться дифференциальным уравнением второго порядка [15]: $m = (d^2x/dt^2) = -c \times x - \mu(dx/dt)$, продифференцировав их по времени, получим выражение:

$$V_t = \left[(V_o - K_ф)\exp(-\delta \cdot t) - K_ф\right] \cdot Cos(w \cdot t + \varphi), \quad (1)$$

где m – масса поливной воды;

d^2x/dt^2 - ускорение воды в почвенной толще;

δ - коэффициент затухания амплитуды скорости фильтрации.

При анализе уравнения (1), если $Cos(w \cdot t + \varphi) = 1$, необходимо учитывать, что любой участок кривой, изображающей экспоненциальную зависимость, подобен всей кривой. Другим свойствам этой зависимости является то, что при равных величинах изменения аргумента функция будет изменяться на одну и ту же долю от предшествующего значения. Это означает, что за каждый такт импульса в почву впитывается постоянная доля поливной нормы.

Если по отдельным этапам кинетический коэффициент изменяется, например из-за силы сопротивления и восстановления, то скорость впитывания n–го этапа можно вычислить по формуле:

$$V_t = V_o(1 - \delta_1 \cdot t)(1 - \delta_2 \cdot t)....(1 - \delta_n \cdot t). \quad (2)$$

Произведение $\delta_i \cdot t$ характеризует скорость впитывания за соответствующий этап водоподачи, а $(1 - \delta_i \cdot t)$ означает уменьшение этой скорости в почве.

Таким образом, на основе формулы (1),при $Cos(w \cdot t + \varphi) = 1$ можно получить уравнение Р.Е. Хортона ,Сурина В.А.и Маслова И.В. [16-17]:

$$V_t = (V_o - K_ф)exp(-K_b \cdot t) + K_ф, \quad (3)$$

где K_b - коэффициент пропорциональности.

На основании решения дифференциальных уравнений затухающих колебаний с учетом влажности почвы Ж.С. Мустафаевым получено уравнение, аппроксимирующее процесс впитывания воды в почву при прерывистой водоподаче с достаточной степенью точности [14, с. 265]:

$$V_t = \left(\frac{W_{нв} - W_i}{W_{нв} - W_o}\right)(V_o - K_ф)\exp[-K_b \cdot t] + K_ф, \quad (4)$$

А.И. Голованов [18] предложил зависимость для оценки влагопроводности почвы при неполном ее насыщении, используя формулу С.Ф. Аверьянова [19]при p=3.5 и зависимость капиллярного напора от влажности почвы: $\beta = (W - W_o)/(m - W_o) = \exp(-n \cdot \bar{f}^{-3})$, который получил уравнение скорости впитывания влаги в почву при неглубоком залегании грунтовых вод, имеющего следующий вид:

$$V_t = (1 - \varphi / h_r)[S \cdot t^{-1/2} + K_ф], \quad (5)$$

где n - коэффициент, зависящий от механического состава и структуры почвы, примерно равен 2.7.

Легко заметить, из структуры формул (3), (4) и (5), $(V_o - K_ф) = S$ отражается поглощающая способность почвы и предполагается, что $K_ф$ - это поток беспрепятственного ламинарного течения через непрерывную сеть крупных пор под действием силы тяжести, то есть формулы (4) и (5) могут быть использованы для оценки скорости впитывания при импульсной водоподаче при поливе по бороздам.

Основные результаты исследований НИР

Основное теоретическое положение дискретной технологии полива мобильным режимом полива по бороздам проверялосьна опытно-производственных полях Б.М. Абжапаровым,С.А. Абдукаримовым и Н.Б. Избасовым, под научным руководством Ж.С.Мустафаева в бассейнах рек Шу, Талас и Бадам в Казахстане (таблица 2).

Таблица 2 – Основные элементы технологии полива при дискретной подаче воды

Номератактов	Длительность такта, мин		Общее время водоподачи, мин	Общее время полива, мин	Поданный объем воды, л
	водоподача	паузы			
q=1.50 л/с					
1	83	83	83	166	7500
2	60	59	143	285	5348
3	74	76	217	435	6673
4	31	32	248	498	2789
5	17	17	265	532	1539
	265				23886
q=1.00 л/с					
1	74	74	74	148	4459
2	99	99	173	346	5936
3	104	104	277	554	6273

4	79	79	356	712	4742
5	52	52	408	816	3116
	408				24526
q=0.75 л/с					
1	486	-	486	486	21300

Подача и распределение воды в поливные борозды осуществлялись согласно разработанной схеме полива [11, с. 77]. Средняя продолжительность добега струи по сухой борозде длиной 450 м при заданном расходе 1.50 л/с составляет 2.1-2.5 часа, а при 1.0 л/с - 2.8-3.4 часа. При втором и последующих импульсах эти показатели соответственно были 16-60 и 25-75 мин. Такое возрастание скорости движения потока воды по смоченной борозде объясняется снижением шероховатости ложа и дна борозды, резким ухудшением водопроницаемости почвы. Последнее явление вызвано тем, что при первом импульсе разрушаются элементарные микро- и макроструктурные агрегаты почв, набухают илистые и коллоидные частицы. По этим причинам в смоченной борозде меньше потери воды по длине участка. Обычно они не превышают 10-20% от величины подаваемого расхода в начале борозды. Поэтому сток воды при втором и последующих импульсах впитывания в 3-4 раза меньше по длине пути и оставшаяся часть потока в основном расходуется на увлажнение концевых отрезков борозды. В результате создаются условия для ускоренного (в 3-4 раза) передвижения потока до следующей расчетной отметки и сокращения продолжительности паузы между импульсами (таблица 3).

Таблица 3 – Распределение поливной воды по длине борозды при дискретной подаче воды

Номератактов	Длина добегания струи, м	Фактическая поливная норма по отрезкам борозды, $м^3$/га				
		1 м	100 м	200 м	350 м	450 м
$q = 1.50$ л/с						
1	34	591.4	514.2	363.0	-	-
2	40	-2.9	100.1	140.3	372.6	-
3	41	131.9	69.4	123.9	254.4	392.5

4	50	66.1	44.1	119.4	69.1	114.2
5	-	24.5	32.6	39.5	56.7	161.1
		811.0	760.2	786.1	747.8	667.8
$q = 1.00$ л/с						
1	22	312.6	-	292.7	-	-
2	26	211.7	-	352.6	146.3	-
3	37	86.0	-	27.6	366.5	260.0
4	46	172.1	-	83.3	51.1	245.5
5	-	61.6	-	66.9	115.8	125.8
		844.0	-	823.0	679.7	641.3
$q = 0.75$ л/с						
1	-	858.8	715.8	565.3	-	455.1

Поливная норма при дискретной подаче воды изменяется: при первом импульсе она была равна 300-600 м^3/га, втором -100-400 м^3/га, а затем -30-200 м^3/га в зависимости от расхода струи в борозде, вся расчетная норма 800 м^3/га внесена за пять импульсов в течение 4.4-6.6 часов. Анализ почвенных проб показал относительную равномерность распределения поданной воды по всей длине борозды. При дополнительном импульсе равномерность увлажнения достигала 0.90. В створах 1, 100, 200, 350 и 450 м влажность почвы измерялась в слое до 1.5 м, что позволило определить потери воды на глубинную инфильтрацию (таблица 4).

Системно-структурный анализ результатов этих исследований и разработанная математическая модель,на основе решения дифференциальных уравнений баланса расхода воды в борозды с учетом скорости впитывания воды впочву в условиях гидроморфного процесса почвообразования, а также изменением влажности почвы в процессе полива, позволяют осмыслить физическую сущность гидродинамического процесса инфильтрации и могут быть использованы для полного цикла исследований бороздкового полива и его дальнейшего совершенствования.

Таблица 4 –Оценка эффективности полива по бороздам при дискретной подаче воды

Расход воды, л/с	Фактическая поливная норма по отрезкам борозды, м^3/га		Коэффициент равномерности полива	Потери воды на глубинный сброс, м^3/га	Сброс в конце борозды, м^3/га
	начало	конца			
$q = 1.50$	811.0	667.8	0.823	71.6	-
$q = 1.00$	844.0	641.3	0.760	101.3	-
$q = 0.75$	858.8	455.1	0.530	85.0	359.3

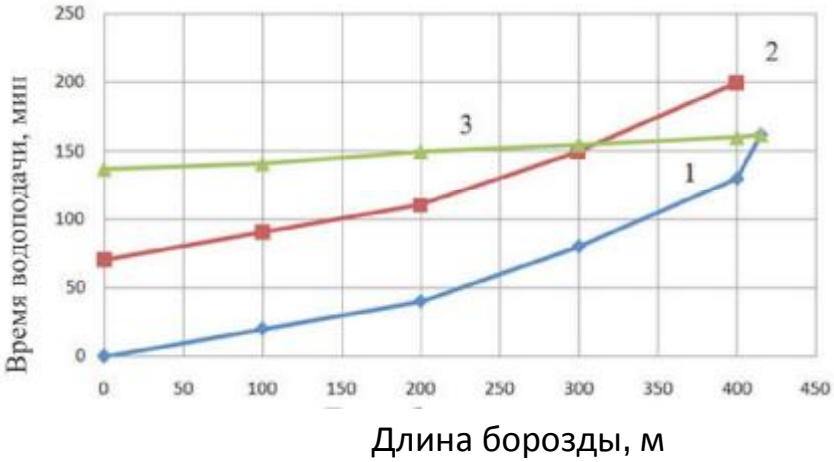
Из данных таблицы 4 видно, что коэффициент равномерности при непрерывной подаче крайне низок - не более 0.53, а фактические потери воды очень велики: на сброс расходуется 30-40 % нормы, на глубинную фильтрацию - 10-15 %. Отсюда КПД полива в контрольном варианте были равен 0.45-0.50.

При орошении непрерывным током воды необходим большой размер поливной струи ( ) для ее быстрого продвижения ( ) от начала до конца борозды,для достижения равномерного полива ( ) и доведения до минимума глубокого просачивания ( ). Этот более крупный ток обычно приводит к избыточному стоку, поскольку он превышаетколичество воды, необходимое для инфильтрации, то есть .

Поливная струя меньшего размера уменьшает сток, но обычно приводит к избыточному глубокому просачиванию из-за медленного движения и большой продолжительности инфильтрации в голове борозды. Если используется увеличение поливной струи, а затем ее сокращение после того как поток достигает конца борозды, уменьшается глубинное просачивание и сток. При орошении по бороздам с непрерывной подачей воды для сокращения поливной струи поливальщик должен найти другое применение для воды, которая не используется вследствие уменьшения поливного тока.

При подаче воды в борозду (, м^3/ч) часть ее инфильтруется (, м^3/ч), а часть остается на поверхности и движется вниз по борозде ( ). На движение влияют многие физические факторы, включая уклон ( ), форму шероховатости борозды ( ). Однако поливная струя и инфильтрационная способность являются первостепенными факторами, определяющими наполнение воды в поверхностном слое и скорость движения воды по борозде , где - длина борозды, м.

Идеально вода должна двигаться настолько быстро, чтобы концевая часть борозды начала получать воду ( ) прежде, чем в начале борозды образуется переувлажнение ( ). Кроме того, было бы идеально если бы скорость движения воды по борозде соответствовала скорости впитывания после прекращения подачи воды, то есть . Следовательно, любой метод ускорения движения фронта смачивания почвы путем изменения гидродинамики поверхностного стока или предпочтительное изменение и характеристик инфильтрации приводит к улучшению коэффициента полезного действия (КПД) поверхностного орошения (рисунок 2).



1- кривая движения воды; 2- необходимая продолжительность впитывания;

3- кривые периода добегания и спада

Рисунок2 - Кривые добегания и спад (впитывания) поливной струи

Вода, оставшаяся в бороздепосле прекращения подачи ее в борозду, продолжает впитываться в почву и стекать по борозде до полного опорожнения борозды. Продолжительность спада ( ) – это время, в течение которого вода исчезает с поверхности борозды или это конец возможного времени впитывания. При поливе по бороздам, имеющим уклон спад струи обычно начинается в начале борозды и прекращается в ее нижнем конце. Кривые движения воды по бороздам и полного впитывания (спад), а также кривые движения воды и спада имеет общую закономерность, и только отстают друг друга по интенсивности прохождения процесса. Время между двумя кривыми

представляет собой время полного впитывания. Если кривая орошения начерчена параллельно кривой продвижения воды в промежуток времени, необходимый для полного впитывания, то можно видеть, что продолжительность впитывания больше или меньше времени, необходимого для инфильтрации. При дискретном орошении вода подается прерывисто, чередуя движение воды и спад (впитывание) струи. При этом трудно использовать данные о передвижении воды и спад струи для определения времени впитывания и инфильтрации воды. Если довести кривые движения воды по борозде и впитывания до пересечения, то будет представлен сток с поля ( ).

Продолжительность дискретного полива создается рядом включений($t_{вк}$) и выключений ($t_{вык}$) подачи воды в борозду. Продолжительность цикла ($t_ц$)– это период времени, необходимый для завершения попуска воды в борозду и следующей за ним паузы, то есть состоит из продолжительности попуска ($t_{по}$) и пауза ( ) до следующего подачи воды борозды. Время цикла может быть любой желаемой продолжительности и может изменяться от нескольких минут до нескольких часов. Рабочий цикл (полуцикл) время ( ), за которое вода подается в группу борозд, расположенную по одну сторону распределительного оросителя, до переключения его на другую сторону. Коэффициент цикла – это соотношение продолжительности работы оросителя к продолжительности цикла: .

Обсуждение полученных данных и заключение

Как показали результаты исследований по изучению механизма дискретного полива по бороздам в бассейнах рек Шу, Талас и Бадам, в настоящее время преобладает коэффициент цикла равный 0.5, который указывает, что продолжительность рабочего цикла равна продолжительности паузы ( ). Продолжительность полива ( ) – это общее время подачи воды в группу или группы борозды. Продолжительность подачи воды - это время, в течение которого вода фактически подается в борозду ( ). Она обычно одинакова с продолжительностью полива по бороздам с постоянным расходом и является частью продолжительности для дискретного полива. Время движения воды по борозде – это время,необходимое для продвижения воды от верхнего конца борозды до определенной точки борозды, часто называемое временем добегания ( ).

Время инфильтрации – это время, необходимое для впитывания в почву определенного количества поливной воды ($t_b = m / V_t$). Период спада или период полного впитывания (после прекращения подачи воды) – это промежуток времени после прекращения подачи воды до полного впитывания на определенных участках вдоль борозды.Возможное время впитывания – это время в течение, которого вода остается на поверхности, постепенно впитываясь в почву. Коэффициент восполнения дефицита: $K_д = m_{нт} / DW$, где DW – дефицит почвенной влаги, мм; m - поливная норма нетто, мм.

При дискретном поливе скорость впитывания воды в почву после первого импульса в увлаженных отрезках борозды, когда верхний слой почвы, насыщенный водой приближается к коэффициенту фильтрации: $V_t \to K_ф$. Установившийся расход впитывания на длину мокрой борозды ($l_м$) по установившейся скорости впитывания и по смоченному периметру (p) определяется по формуле: $q_{ус} = p \cdot K_ф \cdot l_м$. Продолжительность подачи воды при дискретном поливе по бороздам состоит из двух частей: перемещения струи воды по сухими мокрым отрезкам борозды, то есть $t_o = t_c + t_м$:

$$t_o = \delta(Dq_l, V_t) + \delta(Dq_l, K_F). \qquad (6)$$

Таким образом, при дискретной водоподаче в результате поэтапного увлажнения почвы, в начале борозды создаются условия, сдерживающие скорость впитывания воды, что дает возможность равномерному увлажнению почвы по длине борозды и являются мерами замедления геологического круговорота воды и питательных элементов ($g \to \min$).

Как известно, нестационарный процесс движения воды по поверхности земли и впитывания ее в почву описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Система уравнений Сен-Венана, описывающая процесс движения воды по борозде сучетом путевых потерь, имеет следующий вид [20]:

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{d}{dx}\left(\frac{Q^2}{w}\right) + g \cdot w\left(\frac{dh}{dx} - J + \frac{Q}{K^2}\right) = 0; \qquad (7)$$

$$B\frac{dh}{dt} + \frac{dQ}{dx} - d(x,t) = 0, \qquad (8)$$

где $Q(x,t)$ - объем воды в борозде;

$B(h)$ - ширина зеркала воды в борозде;

$w(h)$ - площадь живого сечения;

$h(x,t)$ - глубина наполненияводы в борозде;

$J(x)$ - уклон дна борозды;

g - ускорение силы тяжести;

$K(h)$ - модуль расхода;

$d(x,t)$ - путевые потери воды на инфильтрацию; t - время.

Величина $d(x,t)$ в уравнении (8) определяется на основе решения двухмерной задачи влагопереноса в почвогрунтах, которая описывается уравнением Ричардса [21]:

$$M\frac{dP}{dt}=\frac{d}{dx}\left(K_w\frac{dP}{dY}\right)-\frac{d}{dY}\left(K_w\frac{dP}{dY}-K_w\right)+f, \qquad (9)$$

где $M(p)=d\theta/dP$ - капиллярная влажность;

$\theta(P)$ - объемная влажность;

$P(x,y,t)$ - давление почвенной влаги;

$K_W(y,P)$ - коэффициент влагопроводностипочвогрунтов;

(X,P) - горизонтальная (по направлению течения поливных вод) и вертикальная координаты отсчета;

$f(Y,P)$ - функция стока, то есть поглощение влаги корнями растений.

Путевые потери воды определяются уравнением:

$$d(x,t)=-d(h)\left(K_w\frac{dP}{dY}-K_w\right), \qquad (10)$$

где $d(h)$ - смоченный периметр.

Предположим, что $dQ/dt=X(t)$ - функция скорости добегания струи по сухой борозде, а $g\times w[(dh/dx)-J-Q/K^2]=(d/w)\int_0^t V(t)\times X'(t)\times dt$ - объем воды или путевые потери воды на инфильтрацию на отрезке dx за время t, $d/dx(Q^2/w)=q/w$ - начальная скорость продвижения на створе $x=0$. Тогда с учетом того, что инерционные силы на 2-3 порядка меньше остальных сил, после некоторыхпреобразований в системе уравнений (10) получим:

$$X'(t)=\frac{q}{w}-\frac{a}{w}\int_0^t V_\tau\times X'(t)\times dt, \qquad (11)$$

где q - расход воды в начале борозды;

w - площадь живого сечения в голове борозды;

a - смоченный периметр борозды;

V_τ - функции скорости впитывания в створе X в момент t, $\tau=t-t_1$; $X'(t)=dX/dt$ - скорость продвижения лба струи по борозде в момент t.

При решении интегрально-дифференциального уравнения (11) использованы ядро уравнений(4) и (5), то есть решаются уравнения [12, с. 51-54]:

$$X'(t)=\frac{q}{w}-\frac{a}{w_o}\int_0^t\left[b(V_o-K_\phi)\exp[-K_в(t-t_1)]+K_\phi\right]X'(t)dt; \qquad (12)$$

$$X'(t) = \frac{q}{\omega} - \int_0^t \left(m K_ф + \frac{S}{\sqrt{t - t_1}} \right) X'(t)\,dt, \qquad (13)$$

где $q = q(t)$ – функция времени,

$m = (\alpha/\omega)(1 - \varphi/h_k) = const > 0$,

$K_ф = const > 0$, $X(0) = 0$, $S = (V_o - K_ф) = const > 0$, $\beta = const < 0$.

Уравнение (12) и (13) можно решить с помощью преобразования Лапласа [21, с. 212-215], тогда на основе уравнения (12) после преобразования получим:

$$X(t) = (q/\alpha \cdot K_ф)[1 - B \cdot \exp(-K_б \cdot t), \qquad (14)$$

где $L_o = q/\alpha \cdot K_ф$ - предельная длина добегания струи по борозде;

$$K_б = 0.5\left[K_b + \frac{(V_o - K_ф)\cdot\eta + K_ф}{R}\right] - \sqrt{\left[K_b + \frac{(V_o - K_ф)\cdot\eta + K_ф}{R}\right]^2 - 4\frac{K_b \cdot K_ф}{R}}$$

- коэффициент пропорциональности движения воды, равный 1/4; $B = \{K_b + [(V_o - K_ф)\cdot\eta / R] - K_б\} / \{K_b + [(V_o - K_ф)\cdot\eta / R]\}$ - безразмерный параметр.

Уравнение (14) при $\eta = 1$ совпадает с общеизвестными формулами В.А. Сурина и И.В. Маслова [17, с. 53-54].

На основе решения (13) получим уравнение для функции $X(t)$, связывающее длину пути добегания воды в борозде X и время t [22]:

$$X(t) = L_o \left\{ \frac{1}{(1+\varphi/h_k)} + \frac{\exp(P_1 \cdot t) \cdot erfc(-\sqrt{P_1 \cdot t}}{(P_1/K_ф) - (1+\varphi/h_k)} + \frac{\exp(P_2 \cdot t) \cdot erfc(-\sqrt{P_2 \cdot t}}{(P_2/K_ф) - (1+\varphi/h_k)} \right\},$$

Таким образом,на основе балансового уравнения воды в борозде и скорости впитывания воды в почву, характеризующих соответственно скорость впитывания воды с учетом глубины залегания грунтовых вод и начальную влажность почвы, получена математическая модель, которая позволяет определить оптимальные элементы техники полива по бороздам и может быть использована для полного цикла исследований бороздкового полива и его дальнейшего совершенствования.

В результате теоретических и экспериментальных исследований установлена динамика впитывания воды в почву и движения воды в борозде в процессе дискретного полива.На основе совместного решения систему уравнений нестационарного движения воды по поверхности земли Сен-Венана и модели впитывания воды в почву А.И. Голованова, получена модель движения поливной воды по бороздам, которая позволяет определять оптимальные элементы техники полива по бороздам.

Разработанная математическая модель, на основе решения дифференциальных уравнений баланса расхода воды в борозды с учетом скорости впитывания воды в почву в условиях гидроморфного процесса почвообразования, а также с изменением влажности почвы в процессе полива,

позволяет определить оптимальные элементы техники полива по бороздам и могут быть использованы для полного цикла исследований бороздкового полива и его дальнейшего совершенствования.

Список литературы

1. Вырлев И.С. Импульсный режим орошения по бороздам // Хлопководство, 1979.№ 1. - С. 39-40.

2. Безбородов Ю.Г., Безбородов Г.А., Эсанбеков М.Ю.Критерии качества бороздкового полива // Известия ТСХА. –2012.- №1.–С. 94-100.

3. Сатторов Ш.Расчет элементов технологии и техникиполива сельскохозяйственных культур побороздам на сероземных почвах вусловиях Гиссарской долины// Кишоварз. – 2013. – №1. – С. 37-39.

4.Мустафаев Ж.С., Абдикеримов С.А., Избасов Н.Б. Математическое моделирование движения жидкости по бороздам // Ауэзовские чтения – 7: М. Ауэзов и актуальные проблемы казаховедения: тр. Междунар. науч.-практ. конф. – Шымкент, 2008. - С.73-78.

5.Tabuada M.A., Rego Z.J.C., Vachaud G., Pereira L.S..Modelling of furrow irrigation. Advance with two-dimensional infiltration // Agricultural Water Management.– 1995. – Vol. 41. №3.- pp 203-221.

6.Tabuada M.A., Rego Z.J.C., Vachaud G., Pereira L.S.Two-dimensional infiltration under furrow irrigation: modelling, its validation and applications// Agricultural Water Management. –1995. – Vol. 27.№2.–pp.105-123.

7. Holzapfel E.A., Jara J., Zuniga C., Marino M.A., Billib M.Infiltration parameters for furrow irrigation // Agricultural Water Management.– 2004. – Vol. 68. №1.–pp.19-32.

8.Rasoulzadeh A., Sepaskhah A.R. Scaled Infiltration Equations for Furrow Irrigation // Biosystems Engineering. –2003. – Vol. 86.- №3, -pp 375-383.

9. Sorousha F., Fentonb J.D., Mostafazadeh-Farda B., Mousavia S.F., Abbasic F.Simulation of furrow irrigation using the Slow-change/slow-flow equation// Agricultural Water Management. – 2013. – Vol. 116.№1– pp.160-164.

10. SarehSayari, Majid Rahimpour, Mohammad Zounemat-Kermani. Numerical modeling based on a finite element methodfor simulation of flow in furrow irrigation // Paddy Water Environ – 2017. – Vol. 15. №15(4). –pp 879-887

11. Мустафаев Ж.С., Байбатшаев Б.Н., Абжапаров Б.М. Физико-математическое обоснование процесса влагопереноса при самотечном поверхностном поливе по бороздам // Вест.сельскохозяйственной науки Казахстана.– 1989.– №3. – С. 75-78.

12. Мустафаев Ж.С., Орынбеков А.О., Байбатшаев Б.Н. Практикум по решению фильтрационных задач в мелиорации на ЭВМ СМ4-20 (Учебное пособие). -Ташкент, 1990. –С. 40-58.

13.Мустафаев Ж.С., Абжапаров М.М., Абдекеримов С., Пулатов К. Локальное поверхностное орошение по бороздам // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана.– 1990. – №6. – С. 85 - 90.

14. Мустафаев Ж.С. Почвенно-экологическое обоснование мелиорации сельскохозяйственных земель в Казахстане. – Алматы: Наука, 1997. - 348 с.

15. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – М.: Наука, 1974.- 831 с.

16. Изотермические передвижения влаги в зоне аэрации /Под ред. С.Ф. Аверьянова.– Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 168 с.

17. Сурин В.А., Маслов Н.В. Расчет элементов техники бороздкового полива на больших уклонах // Гидротехника и мелиорация.– 1977. – №8. – С 49-56.

18.Голованов А.И. Расчет впитывания влаги в почву при неглубоких уровнях грунтовых вод // Комплексное мелиоративное регулирование: Сб. науч. трудов МГМИ.-М., 1981. – С.26-35.

19.Аверьянов С.Ф. Зависимость водопроницаемости почвогрунтов от содержания в них воздуха // Гидравлика.– 1949. – Т.69.№2. – С. 141-144.

20. Епихов Г.П. Математическая модель плановой фильтрации во взаимосвязи с речным стоком и ее реализацией //Водные ресурсы. – 1980. – №2. – С. 35-50.

21. Михлин С.Г. Лекции по линейным интегральным уравнениям. – М.: Физматгиз, 1959. – 234 с.

22. Избасов Н.Б.Разработка водосберегающей технологии орошениякукурузы на силос на лугово-сероземных почвах юго-востока Казахстана:автореф. ... канд. техн. наук. – Тараз, 2010. – 20 с.

Түйін

Жер бетімен суару, әсіресе жүйекпен суару суды механикалық көтеруді пайдаланатын (жаңбырлатып, топырақ ішінен, тамшылатып) суару тәсілдеріне қарағанда шығындардыңтөмен болуы, неғұрлым тиімді энергия талаптар мен тамыр аймағының жақсы аэрациясысалдарынан көп пайдаланылады. Жер беті суару жүйелерін жобалау, бағалау және модельдеу топырақтың инфильтрациялық қасиеттері және танап бетімен судың қозғалысытуралы білімгенегізделеді.

Инфильтрация жылдамдығындағы кеңістіктік өзгерістер жер үсті суару жүйелерін басқаруды өте күрделі процесске айналдырады. Сонымен қатар, жүйекпен суару кезінде инфильтрация көрсеткіштері қозғалыс жылдамдығыен әр түрлі болуы,жүйек өлшемдері және топырақтағы бастапқы су мөлшеріөзгеруі мүмкін.

Жер бетімен судың тұрақсызқозғалупроцессі және оның топыраққа сіңуі сызықсыз дербес туындылы дифференциалдық теңдеулер жүйесі арқылы сипатталады. Жүйекпен дискретті суару кезінде судың топыраққа сіңу динамикасын және жүйекпен суғару элементтерін зерттеу үшін топырақтың ылғалдылық режимдері бойынша жүргізілген эксперименттік зерттеулер мәліметтері пайдаланылды. Жер бетімен судың тұрақсыз қозғалысын және оның топыраққа сіңуінталдау сұйықтықтың жүйекпен қозғалыс теңдеуі шешілді.

Сен-Венантеңдеуін қолданып, жүйекпен суару кезінде топырақта судың қозғалысы моделі ұсынылған. Бұл модель,жер асты суларының терендігі мен топырақтың бастапқы ылғалдығы ескере отырып, судың тоыпараққа сіңу жылдамдығын сипаттайды және топырақтың уақыт аралығында ылғалдану шебі туралы ақпарат береді, ол өз кезегінде тамыр аймағындағы сақталған су мөлшерін

сандың түрде анықтауға мүмкіндік береді, және де сүзілу шығынын берілген уақыт аралығыны мен топырақтың кез-келген тереңдігіне қатысты есептеуге болады.

Summary

Surface irrigation, especially furrow irrigation, is used more than irrigation with mechanical lifting of water (sprinkler irrigation, intrasoil, drip) due to low costs, more efficient energy requirements and better aeration of the root zone. The design, evaluation and modeling of surface irrigation systems is based on knowledge of the infiltration properties of the soil and the movement of water over the field.

The spatial variation in the rate of infiltration makes the management of surface irrigation systems a very complex process. In addition, the parameters of infiltration during furrow irrigation can vary due to the different speed of movement, the size of the furrow and the initial water content in the soil.

The non-stationary process of water movement along the surface of the earth and its absorption into the soil is described by a system of nonlinear partial differential equations. For studying the dynamics of water absorption of soil and surface watering elements along the furrows with discrete water supply, the data of experimental studies on soil moisture regimes were used. By analyzing the non-stationary movement of water along the surface of the earth and absorbing it into the soil, the equation of fluid movement along the furrows is solved.

A model of the movement of water in the soil during furrow irrigation using the Saint-Venant equation is presented. This model, which characterizes the rate of water absorption, taking into account the depth of groundwater and the initial soil moisture, respectively, provides information on the position of the moistening front in the soil over time, which allows quantifying the amount of water stored in the root zone and calculating the filtration loss for a given time interval and regarding to any given depth of soil.