

М. Хорст, Г. Солодкий

**Расчет элементов техники полива по сквозным бороздам
при поливе постоянной струей, реализуемый
моделью SIRSAN-II**

НИЦ МКВК

Введение

Основными факторами, определяющими оптимальные для конкретных условий сочетания элементов техники полива ($T_{\text{полива}}$, $q_{\text{борозды}}$, $L_{\text{борозды}}$) при известных поливных нормах, являются уклон в направлении полива и водопроницаемость почвогрунтов.

В аридной зоне при проектных проработках широко используются нормативные элементы техники полива, рассчитанные Н.Т. Лактаевым [1,2] для предложенных им типовых сочетаний «уклон-водопроницаемость», получившие дальнейшее развитие в работе Г.Н. Павлова и его учеников [3]. Основаны они на большом объеме полевых исследований поливов по бороздам на фоне предполивной влажности 0,65 от наименьшей влагоемкости (НВ). В производственных условиях добиться оптимальных (одновременное удовлетворение двух критериев: высокая эффективность использования поливной нормы и приемлемая (не ниже 80 %) равномерность увлажнения) сочетаний элементов техники полива довольно сложная задача. Нестандартизированную длительность водоподачи в борозды сложно увязать с организацией орошения группы полей. Без увязки водоподачи в контур орошения с организацией орошения на отдельных полях этого контура существенно возрастают организационные потери оросительной воды, превышающие по нашим оценкам 25 % от водоподачи в контур [4].

На практике длительность водоподачи в борозды ($T_{\text{водоподачи}}$) и зависящая от нее длительность полива ($T_{\text{полива}}$) определяются не оптимальной продолжительностью полива, а возможностями организации эффективного полива. С этой точки зрения организацию орошения и соответственно водоподачи в борозды на практике принимают, соотносясь с продолжительностью светлого периода суток. В условиях неавтоматизированного полива (капельное, внутрпочвенное орошение, дождевание) заправку борозд и регулирование бороздных струй по фронту полива можно производить только в светлый период суток, т.е. приспособив график начала и завершения водоподачи в борозды к светлому периоду. Здесь не так много вариаций. Для нашей широты местности это в основном 24-12-8-часовые такты водоподачи на поливные делянки (т.е. площади одновременного полива на поле). При этом:

- при 24-часовых тактах переключения расходов на орошаемых полях возможно осуществлять в любое время светлого периода суток
- при 12-часовых тактах переключения расходов на орошаемых полях возможно осуществлять в период с 5:00 до 9:00 утра и, соответственно, с 17:00 до 21:00 вечера (что возможно только в середине лета)
- при 8-часовых тактах переключения расходов на орошаемых полях необходимо осуществлять в 5:00–13:00–21:00 (что возможно только в середине лета).

Длина борозд конкретного поля обычно принимается, исходя из конфигурации поля, уклонов в направлении полива и длины гона сельскохозяйственной техники на предполивных и послеполивных обработках почвы. Таким образом, на практике в основном варьируют *расходом в борозду*, сообразуясь с инфильтрационными характеристиками почвогрунтов. На больших уклонах и при легких по мехсоставу почвах на малых и средних уклонах расходы ограничивают эрозионно-безопасными величинами поливных струй.

Более обоснованно выбор бороздных расходов осуществляется на основе пробных поливов [5]. Одновременно при этом уточняются инфильтрационные характеристики почвогрунтов, которые затем можно использовать при расчетах по выбранной модели полива.

Разработанная нами модель SIRSAN-II (версия 02) [6] так же, как и известные зарубежные модели SIRMOD¹ и SRFR² - является одномерной математической моделью для анализа поверхностного полива по сквозным бороздам, т.е. инструментом для предсказания. При использовании модели Пользователь задает значения параметров, влияющих на полив (поливная норма, геометрия борозд, гидравлическая шероховатость, параметры инфильтрации, продолжительность водоподачи), а модель предсказывает необходимый расход водоподачи, продольное распределение увлажнения, объем поверхностного и глубинного сбросов и характеристики эффективности и равномерности.

Специфическими отличиями SIRSAN-II является то, что в этой модели реализуется принцип стандартизации длительности водоподачи в борозды с тем, чтобы увязать организацию полива отдельной поливной деланки/поля с организацией орошения в относительно крупном орошаемом контуре. Исходя из этого, при требуемой поливной норме и соответствующей ей рассчитываемой длительности её впитывания определяется (а не задается, как в моделях SIRMOD и SRFR) расход водоподачи в борозду в зависимости от задаваемой пользователем длительности водоподачи из стандартного ряда длительностей. Ряд всплывающих подсказок даёт возможность пользователю сузить область поиска наиболее эффективных решений для конкретных условий объекта. В

1 Университет штата Юта (США), Логан, UT 84322-9300, 1989.

2 Департамент сельского хозяйства Соединенных Штатов Америки, Научно-исследовательская сельскохозяйственная служба, Лаборатория охраны водных ресурсов США, 1993.

отличие от SIRMOD и SRFR (табл. 1) в модели учтены специфические условия объектов Центральной Азии и разработки ведущих ученых региона, занимавшихся проблемами поверхностного полива.

Интерфейс программы способствует организации дружественного диалога с пользователем и быстрому освоению приемов работы с ней.

Таблица 1

**Ориентация моделей SIRMOD, SRFR и SIRSAN-II (версия 02)
на уровень пользователей**

Модель	Уровень пользователей
SRFR	<i>Очень высокий и узко-профессиональный.</i> Научные сотрудники, занимающиеся проблемами поверхностного полива
SIRMOD	<i>Высокий.</i> Научные сотрудники, занимающиеся проблемами поверхностного полива, проектировщики высоких категорий.
SIRSAN-II (версия 02)	<i>Средний. Проектировщики.</i> Студенты гидромелиоративных специальностей, специалисты АВП для принятия решений в практической деятельности при организации водосберегающего орошения.

Алгоритм расчетов, реализуемый моделью

Блок-схема расчетов, реализуемых моделью SIRSAN-II, приводится на рис. 1.

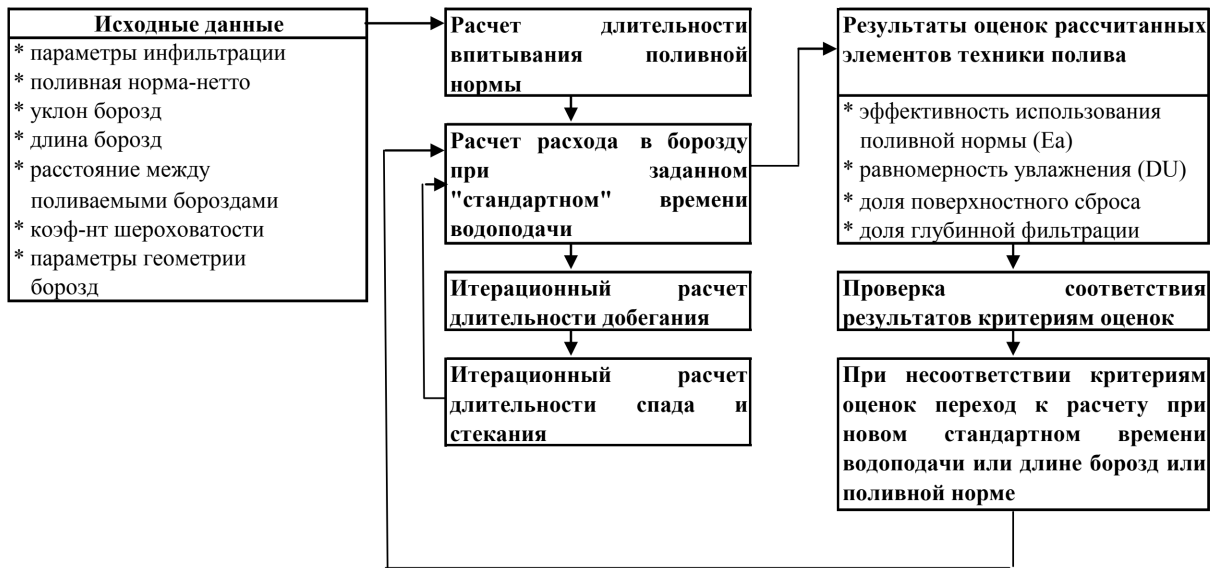


Рис. 1. Блок-схема расчетов, реализуемых моделью SIRSAN-II

Исходными параметрами, необходимыми для расчетов элементов техники полива по модели **SIRSAN-II** являются:

- Параметры инфильтрации - $f_0(\text{м}^3/\text{мин}/\text{м})$, a и $k(\text{м}^3/\text{мин}/\text{м}^a)$, входящие в уравнение Костякова-Льюиса
- Поливная норма - $Z_{\text{треб.}}$ (мм или $\text{м}^3/\text{га}$), определяемая разностью между FC (полевой влагоемкостью почвы в корнеобитаемой зоне) и фактическим содержанием почвенной влаги в расчетном слое корнеобитаемой зоны к моменту полива
- Продольный уклон поля - S (м/м)
- Длина борозд – L (м)
- Расстояние между поливаемыми бороздами - $d(\text{м})$
- Коэффициент гидравлической шероховатости ложа борозды – n ($\text{м}^{-1/3} \text{с}$)
- Параметры геометрии борозды. - **p1** и **p2**.

Первый этап - расчет эффективного времени впитывания

На первом этапе рассчитывается *эффективное время впитывания заданной поливной нормы* (по В.Р. Уолкеру и Г.В. Скогербою [7])

Теоретически при поливе любая точка по длине борозды должна увлажняться в течение *эффективного времени впитывания заданной поливной нормы*.

Однако, при поверхностном поливе по бороздам это сложно осуществить (при стремлении обеспечить впитывание заданной поливной нормы в конце борозды, излишне долго увлажняются начальные участки), но подбором соответствующих элементов техники полива стремятся сократить разрыв во времени увлажнения головных и концевых участков борозд и вместе с тем не допустить чрезмерного поверхностного сброса в конце борозд и излишней глубинной инфильтрации.

Процедура проектирования требует, чтобы была известна необходимая продолжительность впитывания, обеспечивающая впитывание $Z_{\text{треб.}}$ (эквивалентно $m_{\text{нетто}}$ по местной терминологии). Это время, обозначаемое $\tau_{\text{треб.}}$, требует нелинейного решения уравнения инфильтрации, предложенного А.Н. Костяковым (1):

$$Z = k \tau^a + f_0 \tau \quad (1)$$

где Z - суммарное впитывание на единицу длины, $\text{м}^3/\text{м}$ (подразумевается на борозду или на единицу ширины);

τ - продолжительность впитывания в мин;

a – постоянный показатель степени;

k - постоянный коэффициент, $\text{м}^3/\text{мин}^a/\text{м}$ длины;

f_0 - установившаяся скорость впитывания, $\text{м}^3/\text{мин}/\text{м}$ длины.

Второй этап - стандартизация длительности водоподачи в борозды

Общая продолжительность полива по бороздам определяется суммой двух параметров полива:

$$T_{\text{полива}} = T_L + \tau_{\text{треб.}} \quad (2)$$

где

T_L — длительность (мин) добегания поливной струи до конца борозды от начала водоподачи;

$\tau_{\text{треб.}}$ — необходимая длительность (мин) впитывания поливной нормы в любой точке борозды;

Отметим, что общая продолжительность водоподачи в борозду для обеспечения требуемой поливной нормы меньше продолжительности полива $T_{\text{полива}}$ на величину длительности стекания в конечном створе борозды $\tau_{\text{стекания.(L)}}$:

$$T_{\text{водоподачи}} = T_L + \tau_{\text{треб.}} - \tau_{\text{стекания.}(L)} \quad (3)$$

где

$\tau_{\text{стекания.}(L)}$ – длительность (мин) стекания воды из борозды в конечном створе борозды после отключения водоподачи

Назначив в первом приближении предварительное *стандартное время водоподачи в борозду*, обычно это: 6 час/8 час/12 час/24 час, на следующем этапе расчета определяем/уточняем *необходимый расход водоподачи в борозду*, при котором обеспечивается стандартная длительность водоподачи.

Задача эта решается подбором, т.к. для ее решения необходимо знать T_L и $\tau_{\text{стекания.}(L)}$, зависящие в свою очередь от расхода в борозду. Таким образом, эти два параметра определяются с помощью серии итерационных расчетов.

Третий этап - расчет добегания поливных струй

В общем виде траектория добега описывается уравнением (4) [7]:

$$x = pt_x^r \quad (4)$$

где x – длина добега в м от начала борозды, которая достигается за t_x минут водоподачи, а p и r – параметры подгонки.

Для определения эмпирических параметров p и r методом «две точки» используются длительности добега до точки близ половины длины борозды $T_{0.5L}$ и добега до конца борозды T_L :

Четвёртый этап - расчет длительности спада

Время спада с начала полива, т.е. полное опорожнение борозды (от начала полива) $T_{\text{спада}(L)}$ вычисляется исходя из условия, что конец борозды получает требуемую расчетную норму увлажнения (5) [7]:

$$T_{\text{спада}(L)} = T_L + \tau_{\text{треб}} \quad (5)$$

где $\tau_{\text{треб.}}$ – необходимое время впитывания расчетной поливной нормы

T_L – длительность добега до конца.

Пятый этап – оценка увлажнения по длине борозды

На основе рассчитанных данных по: необходимой длительности впитывания поливной нормы - $\tau_{\text{треб.}}$; продолжительностям добеганий поливных струй до середины и до конца борозд – T_L и $T_{0.5L}$; времени спада в голове борозды от начала полива $T_{\text{спада}(0)}$ оценивается увлажнение поливом в выбранных створах по длине борозды.

Шестой этап – оценка характеристик полива по бороздам

Основными критериями приемлемости для конкретных условий рассчитанных элементов техники полива являются: *эффективность использования поливной нормы* - E_a на орошаемом поле/КПД техники полива и *равномерность увлажнения по длине борозды* – DU .

Эффективность использования поливной нормы непосредственно на орошаемом поле/КПД техники полива, зависит от выбранных при определенных сочетаниях «уклон в направлении полива - водопроницаемость почвогрунтов» элементов техники полива: $Z_{\text{треб.}}$ – требований сельхозкультуры на орошение в определенную фазу ее развития или поливной нормы - $m_{\text{нетто}}$; q - расхода водоподачи в голове борозды, $T_{\text{в-подачи}}$ – длительности водоподачи в борозду, L – длины борозды. При этом наряду со стремлением иметь максимально возможную в конкретных условиях эффективность использования поливной нормы/КПД техники полива, необходимо обеспечить относительно высокую равномерность увлажнения по длине борозды. Фермер, и особо в условиях отсутствия платы за воду, заинтересован в достижении высокой равномерности увлажнения, часто в ущерб эффективности использования поливной нормы.

DU – показатель равномерности увлажнения, характеризует систему орошения, а E_a – эффективность использования поливной нормы, является эксплуатационным показателем управления [5, 8]. Они в предлагаемых нами форматах описываются следующими зависимостями:

$$m_{\text{брутто}} = (T_{\text{в-подачи}} (\text{мин}) \times q (\text{м}^3/\text{мин})) \times \left(\frac{10000 (\text{м}^2)}{L (\text{м}) \times d (\text{м})} \right) \quad (6)$$

$$E_a = \left(\frac{Z (\text{м}) \times 10000 (\text{м}^2)}{m_{\text{брутто}} (\text{м}^3/\text{га}) \times d (\text{м})} \right) \times 100 (\%) \quad Z_{\text{нижней четверти}} \geq Z_{\text{сред. по длине}} \quad (7)$$

$$E_a = \left(\frac{Z_{\text{нижней четверти}} (\text{м}) * 10000 (\text{м}^2)}{m_{\text{брутто}} (\text{м}^3/\text{га}) \times d (\text{м}^2)} \right) \times 100\% \quad Z_{\text{нижней четверти}} \leq Z_{\text{сред. по длине}} \quad (8)$$

$$DU = \frac{Z_{\text{нижней четверти}} (\text{м})}{Z_{\text{сред. по длине}} (\text{м})} \times 100(\%) \quad (9)$$

где Z – слой (м), требуемый для пополнения влагой корнеобитаемой зоны/поливная норма нетто – $m_{\text{нетто}}$;

$m_{\text{брутто}}$ – водоподача-брутто ($\text{м}^3/\text{га}$) на орошаемую площадь;

$Z_{\text{нижней четверти}}$ – средний слой (м), впитавшийся на нижней четверти борозды;

$Z_{\text{сред. по длине}}$ – средний слой воды, впитавшейся по длине всей борозды (м).

Седьмой этап – оценка глубинной инфильтрация и поверхностного сброса

На заключительном этапе оцениваются глубинная инфильтрация за пределы борозды DPR:

$$DPR = \frac{Z_{\text{сред. по длине}} (\text{м}) - Z (\text{м})}{m_{\text{брутто}} (\text{м})} \quad (10)$$

$$DPR(\%) = \frac{DPR}{D} \times 100 \quad (11)$$

и поверхностный сброс в конце борозды:

$$TWR = D - DPR - \left(\frac{Z_{\text{борозды}} \times 10000}{d} \right) \quad (12)$$

$$TWR(\%) = \frac{TWR}{D} \times 100 \quad (13)$$

Результаты

С учетом принципов и алгоритма, реализованного в модели SIRSAN-II были рассчитаны предпочтительные параметры полива по сквозным бороздам (с $E_a > 60\%$ и равномерностью увлажнения $DU > 80\%$) для основных типов водопроницаемости в широком диапазоне уклонов при типичном коэффициенте

гидравлической шероховатости ложа борозды $n=0,025$ и даны предпочтительные «коридоры» значений. Эти значения (табл. 2–6) могут служить ориентиром для дальнейших поисков оптимальных в конкретных условиях элементов техники полива, т.е. сочетаний: длин борозд, расстояний между поливаемыми бороздами, поливных норм, стандартизированных длительностей водоподачи и расходов водоподачи в борозды.

Выводы

- Поиск возможных путей водосбережения и рационального водопользования в конкретных природно-хозяйственных условиях предусматривает разработку и оценку компромиссных решений, позволяющих наиболее эффективно и продуктивно использовать воду, балансируя требования сельхозкультур на орошение и экологические требования.
- Для сокращения организационных потерь оросительной воды на самотечных оросительных системах из-за неувязки орошения единичного поля с группой полей массива орошения целесообразно стандартизировать длительность водоподачи на поливные делянки, соотносясь с организацией орошения в контурах единицы водопользования. Этот принцип реализован в имитационной модели SIRSAN-II.
- Рекомендуемые предпочтительные «коридоры» значений параметров техники полива по сквозным бороздам минимизируют поверхностный и глубинные сбросы.

Таблица 2

**Почвогрунты низкой водопроницаемости
(мехсостав – глина)**

Параметры		Единицы измерения	Уклоны (м/м)		
			малые	средние	большие
			0.0025>S>0.001	0.0075>S>0.0025	0.025>S>0.0075
Длина борозды	L	м	200...400	100...400	100...200
Расстояние между поливаемыми бороздами	d	м	0,9	0,6/0,9	0,6
Поливная норма	m _{нетто}	м³/га	1000...1100	1000...1100	800...900
Длительность водоподачи	T _{вод.}	час	48	48	36...48
Диапазон расходов	q	л/с	0,2...0,4	0,05...0,4	0,05...0,20

Таблица 3

**Почвогрунты пониженной водопроницаемости
(мехсостав – тяжелый суглинок)**

Параметры		Единицы измерения	Уклоны (м/м)		
			малые	средние	большие
			0.0025>S>0.001	0.0075>S>0.0025	0.025>S>0.0075
Длина борозды	L	м	100...400	100...200	100
Расстояние между поливаемыми бороздами	d	м	0,9	0,6/1.2*/0,9/1.8*	0,6/1.2*
Поливная норма	m _{нетто}	м³/га	800...1100	700...900	800...900
Длительность водоподачи	T _{вод.}	час	12...24	12...48	36...48
Диапазон расходов	q	л/с	0,2...1,2	0,1...0,6	0,05...0,20

Таблица 4

**Почвогрунты средней водопроницаемости
(мехсостав – средний суглинок)**

Параметры		Единицы измерен.	Уклоны (м/м)		
			малые	средние	большие
			0.0025>S>0.001	0.0075>S>0.0025	0.025>S>0.0075
Длина борозды	L	м	100...400	100...200	70...100
Расстояние между поливаемыми бороздами	d	м	0,9/1,8*	0,6/1,2*/0,9/1,8*	0,6/1,2*
Поливная норма	m _{нетто}	м³/га	800...1000	800...900	800...1000
Длительность водоподачи	T _{вод.}	час	6...36	6...36	6...24
Диапазон расходов	q	л/с	0,5...1,9	0,2...1,2	0,10...0,25

Таблица 5

**Почвогрунты повышенной водопроницаемости
(мехсостав – легкий суглинок, супесь)**

Параметры		Единицы измерен.	Уклоны (м/м)		
			малые	средние	большие
			0,0025>S>0,001	0,0075>S>0,0025	0,025>S>0,0075
Длина борозды	L	м	50...150	50...100	50...70
Расстояние между поливаемыми бороздами	d	м	0,9	0,6/1,2**	0,6/1,2**
Поливная норма	m _{нетто}	м³/га	800...900	800	700
Длительность водоподачи	T _{вод.}	час	6...12	3...12	3...12
Диапазон расходов	q	л/с	0,4...1,0	0,2...0,4	0,05...0,20

Таблица 6

**Почвогрунты высокой водопроницаемости
(мехсостав – супесь, песчаные)**

Параметры		Единицы измерен.	Уклоны (м/м)		
			малые	средние	большие
			0.0025>S>0.001	0.0075>S>0.0025	0.025>S>0.0075
Длина борозды	L	м	50...70	50	30...50
Расстояние между поливаемыми бороздами	d	м	0,6/1,2**	0,6/1,2**	0,6/1,2**
Поливная норма	m _{нетто}	м ³ /га	800...900	800	700
Длительность водоподачи	T _{вод.}	час	6	3...6	3...6
Диапазон расходов	q	л/с	0,3...0,6	0,2...0,4	0,05...0,20

* полив через междурядье

Выражение признательности

Авторы выражают признательность профессорам Л.С. Перейре и Дж.М. Гонсалвесу за консультации, благодарность Ш. Хамдамову, Л.С. Соколовой и Т. Ахмедову за помощь в проведении полевых работ, В.В. Дашиной - за компьютерную обработку данных.

Литература

1. Лактаев Н.Т. Полив хлопчатника. - Москва: Колос, 1978. - 176 с.
2. Джурабеков И.Х., Лактаев Н.Т. Совершенствование оросительных систем и мелиорация земель Узбекистана. – Ташкент: Узбекистан, 1983. - 152 с.
3. Павлов Г.Н. Районирование орошаемой территории Узбекистана по рациональным способам орошения. - Ташкент, 1985. - 60 с.
4. Хорст М.Г., Стулина Г.В., Мирзаев Н.Н. Пути водосбережения. – Ташкент: IWMI–НИЦ МКВК, 2001. -172 с.

5. Field assessment of the water saving potential with furrow irrigation in Fergana, Aral Sea basin / Horst M.G., Shamutalov S.S., Pereira L.S., Goncalves J.M. // Agric. Water Manage. – 2005. – Vol. 77. – P. 210-231.

6. Хорст М.Г., Солодкий Г.Ф.. SIRSAN-II – имитационная модель расчета элементов техники полива по сквозным бороздам: Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № DGU 01433. –Ташкент, 2007. - Государственное Патентное Ведомство Республики Узбекистан.

7. Walker, W.R., Skogerboe, G., Surface Irrigation: Theory and Practice. - Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 1987.

8. Pereira, L.S., Oweis, T., Zairi, A.,. Irrigation management under water scarcity // Agric. Water Manage. - 2002. - Vol. 57. - P. 175-206.