

УДК 502/504:631.675.2

**Р. В. ПРОКОПЕЦ, Ф. В. СЕРЕБРЕННИКОВ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова», г. Саратов

**УЧЕТ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВЫ ПРИ ОЦЕНКЕ ОБЪЕМА ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА НА ОРОШАЕМЫХ ЗЕМЛЯХ**

*Для прогнозирования потерь оросительной воды с поверхностным стоком при поливе дождеванием необходимо обладать достоверными сведениями о движения влаги в зоне аэрации. Предложена математическая модель, позволяющая получить количественную оценку динамики формирования поверхностного стока при поливе дождеванием с учетом гидрофизических характеристик почвы. При построении модели использованы основные гидрофизические функции, которые описывают способность почв удерживать и проводить почвенную влагу под действием термодинамических сил и их градиентов. К числу таких функций относятся: функция водоудерживающей способности почв или основная гидрофизическая характеристика и функция влагопроводности ненасыщенных почв. Рассматриваемые гидрофизические функции являются отражением строения порового пространства почвы и поэтому генетически связаны друг с другом. На основе целого ряда представлений о строении порового пространства и феноменологии передвижения влаги в порах почвы были предприняты многочисленные попытки установить аналитически связь между основной гидрофизической характеристикой и функцией влагопроводности. В предложенной модели показана возможность применения функции водоудерживания по Вейбуллу в интерпретации Ю. Н. Никольского и функции влагопроводности по С. Ф. Аверьянову. Предложенная модель адекватно отражает реальную обстановку при поливе с помощью современных дождевальных машин и применима во всех зонах орошаемого земледелия. Полученные расчетные величины слоя поверхностного стока по предлагаемой модели вполне сопоставимы с экспериментальными данными. Расхождения экспериментальных и расчетных данных в первом приближении не превышает 35 %.*

*Орошаемое земледелие, дождевание, интенсивность дождя, основная гидрофизическая характеристика, функция влагопроводности ненасыщенных почв, коэффициент влагопроводности, влагоперенос зоны аэрации, математическая модель, поверхностный сток.*

*For the prediction of irrigation water losses with the surface runoff when watering by sprinkler irrigation it is necessary to have a reliable information about the movement of moisture in the unsaturated zone. There is proposed a mathematical model that allows obtaining a quantitative assessment of the dynamics of surface runoff formation when sprinkling with consideration of hydro physical characteristics of the soil. When building the model there were used basic hydro physical functions that describe the soil ability to hold and conduct soil moisture under the action of thermodynamic forces and their gradients. Among these functions are: function of water-holding capacity of soils or basic hydro physical characteristics and function of hydraulic conductivity of unsaturated soils. The considered hydro physical functions are a reflection of the structure of the soil pore space and therefore genetically connected with each other. On the basis of a number of ideas about the structure of the pore space and the phenomenology of moisture movement in the soil pores there were made numerous attempts to establish analytically a relationship between the main hydro physical characteristics and function of hydraulic conductivity. The proposed model shows the possibility of using the function of water retention according to Weibull in the interpretation of Yu. N. Nickoljsky and function of hydraulic conductivity according to S. F. Averyanov. The proposed model adequately reflects the real situation when watering by modern sprinkling machines and can be used in all areas of the irrigated agriculture. The obtained rating values of the layer of surface runoff according to the proposed model are quite comparable with the experimental data. The discrepancies between experimental and calculated data in the first approximation do not exceed 35 %.*

*Irrigated agriculture, sprinkler irrigation, rain intensity, basic hydro physical characteristics, the function of hydraulic conductivity of unsaturated soils, the coefficient of hydraulic conductivity, the moisture transfer in the aeration zone, mathematical model, surface runoff.*

Негативное влияние ирригации на экологическое состояние окружающей природной среды и ее компонентов общеизвестно. Обширное и нередко недостаточно научно обоснованное антропогенное вмешательство в естественные круговороты вещества и энергии, прежде всего воды, приводит к нарушению устойчивости и деградации мелиоративных агроландшафтов [1, 2].

Одной из самых острых проблем орошаемого земледелия России в настоящее время является прогрессирующая деградация почвенного покрова. Практика оросительных мелиораций и изучение результатов научных исследований показали, что одним из факторов негативного воздействия при дождевании является ирригационная эрозия. Теперь, когда дождевание получило в нашей стране широкое распространение, а в отдельных зонах стало основным способом орошения, приходится констатировать, что этому процессу подвергаются почвы многих орошаемых массивов [3, 4].

Обычно при моделировании режимов орошения сельскохозяйственных культур с целью упрощения задачи величиной поверхностного стока пренебрегают, то есть ограничиваются рассмотрением случая с достаточно хорошо выровненной поверхностью поля и водовпитывающей способностью почвы. К сожалению, в ряде случаев величина стока в вегетационный период может оказаться соизмеримой с другими составляющими водного баланса, а его недоучет может привести к значительным ошибкам при оценке влагообеспеченности культур [5–7].

Представляет несомненный интерес, построить математическую модель, которая позволила бы получить количественную оценку динамики формирования поверхностного стока при поливе дождеванием с учетом гидрофизических характеристик почвы.

При изучении и моделировании движения влаги в почвенной толще важными функциями, уникально характеризующими свойства почвы, являются зависимость давления почвенной влаги от объемной влажности почвы (основная гидрофизическая характеристика или ОГХ), а также зависимость от влажности почвы скорости движения воды через нее (коэффициент влагопроводности) [8, 9].

Примем следующую расчетную схему: полив выполняется дождевальной машиной с одной позиции продолжительностью  $T$ , с постоянной интенсивностью дождя  $\rho$ , поливная норма  $h$  задана и неиз-

менна в течении полива.

Для определенности разделим процесс полива дождеванием на две стадии:

1) первоначальное увлажнение почвы частью поливной нормы до образования поверхностного стока, когда на увлажнение расходуется слой воды  $h_1$ ;

2) дальнейшее увлажнение почвы частью поливной нормы, когда появляется поверхностный сток, и на увлажнение расходуется слой воды  $h_2$ , а на образование поверхностного стока расходуется часть поливной нормы  $h_3$ .

Таким образом, поливная норма складывается из трех частей:  $h = h_1 + h_2 + h_3$ . Будем считать, что уровень грунтовых вод находится достаточно глубоко и не влияет на влагообмен в верхних горизонтах почвы.

Такое разделение процесса полива на две стадии оправдано тем, что механизм увлажнения в каждой из них существенно отличается один от другого. Действительно, на первой стадии впитывающая способность почвы за счет относительно высокого капиллярно-сорбционного потенциала всегда выше интенсивности дождя  $\rho$ . Увлажнение слоя почвы происходит от некоторого начального уровня – предполивной влажности почвы  $\omega_{cr}$  до верхней границы влажности, чаще всего наименьшей влагоемкости  $\omega_{fc}$ . Фронт увлажнения при этом движется с постоянной скоростью, определяемой интенсивностью дождя  $\rho$ .

Значение  $h_1$  на первой стадии полива определяется интенсивностью дождя  $\rho$ , временем от начала полива  $t_1$  и разностью значений влажности почвы перед фронтом впитывания  $\omega_{cr}$  и внутри увлажненного слоя  $\omega_{fc}$ .

Тот факт, что скорость впитывания  $v_t$  равна интенсивности дождя, заставляет перейти к размерности мм/мин от привычной м/сут. С учетом высказанных ограничений формула для вычисления времени первой стадии (в минутах) до начала образования поверхностного стока запишется в следующем виде:

$$t_1 = \frac{1000 \cdot \Delta\omega \cdot (\omega_{fc} - \omega_{cr})}{\rho \cdot \left( \frac{1,44 \cdot \rho}{k_w} - 1 \right)}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – средняя интенсивность дождя, мм/мин;  $k_w$  – коэффициент влагопроводности, мм/мин;  $\Delta\omega$  – разность капиллярно-сорбционных потенциалов до и после границы фронта впитывания, м.

Поскольку капиллярно-сорбционный потенциал до границы фронта впитывания можно принять равным нулю, разность капиллярно-сорбционных потенциалов будет

равна капиллярно-сорбционному потенциалу после границы фронта впитывания и может быть определена с использованием любой апробированной формулы. Мы Авторы данной статьи использовали формулу Вейбулла в интерпретации Ю. Н. Никольского [10]:

$$\varphi = B \cdot \ln \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega - \omega_{\min}}, \quad (2)$$

где  $\omega_{\max}$  – влажность полного насыщения, доли ед.;  $\omega_{\min}$  – некоторая минимально наблюдаемая влажность (максимальная гигроскопичность), доли ед.;  $\omega$  – текущая влажность, доли ед.;  $B$  – масштабный коэффициент, м (для почвенных условий опыта авторами принят  $B = 2$  м).

За первую стадию полива в почву впитается часть поливной нормы, определяемая по формуле:

$$h_1 = \rho \cdot t_1. \quad (3)$$

В работе [11] показано, что для второй стадии движение влаги в зоне аэрации может быть описано уравнением Дарси с учетом гравитационной составляющей:

$$\frac{\Delta z}{\Delta t} = \vartheta_t = k_w \left( 1 + \frac{\Delta \varphi}{z} \right), \quad (4)$$

где  $k_w$  – коэффициент влагопроводности, м/сут;  $\varphi$  – капиллярно-сорбционный потенциал в точке с координатой  $z$ ;  $\Delta \varphi$  – разность капиллярно-сорбционных потенциалов, зависящих от значений влажности почвы перед фронтом впитывания  $\omega_{cr}$  и внутри увлажненного слоя, то есть  $\omega_{fc}$ .

Вторая стадия наступает с момента  $t > t_1$ . Здесь действует механизм впитывания, описанный в [11]. Если принять  $a = \Delta \varphi (\omega_{fc} - \omega_{cr})$ , то можно записать формулу для вычисления продолжительности второй стадии следующим образом:

$$t_2 = \frac{1}{k_w} \left[ h_2 - a \cdot \ln \left( \frac{a + h_1 + h_2}{a + h_1} \right) \right], \quad (5)$$

где  $h_2$  – часть поливной нормы, расходуемая на увлажнение слоя почвы во время второй стадии полива.

Для вычисления коэффициента влагопроводности использовали формулу С. Ф. Аверьянова, которая в условиях эксперимента, проводимого авторами, имела вид:

$$k_w = k_f \left( \frac{\omega_{fc} - \omega_{\min}}{\omega_{\max} - \omega_{\min}} \right)^N, \quad (6)$$

где  $k_f$  – коэффициент фильтрации, м/сут;  $N = 3,5$  или подбирается по данным экспериментов.

Важное замечание: в формуле (5) размерность  $h$  (слой впитавшейся воды) всегда в метрах.

Между  $h_1$  и  $t_1$  (равно как между  $h_2$  и  $t_2$ ) существует взаимно однозначное соответствие. Зная эти показатели всегда можно найти часть поливной нормы, расходуемой на образование поверхностного стока, если принять допущение, что время стока равно времени второй стадии  $t_2 = T - t_1$ . Представляется, что это допущение можно считать приемлемым для современных дождевальных машин, когда интенсивность дождя сопоставима с впитывающей способностью почвы. Действительно, в такой ситуации при прекращении дождевания поверхность почвы практически сразу осушается.

Таким образом, на основании выражения (5) в принципе можно найти  $h_2$ . Величина слоя поверхностного стока, исходя из приведенных расчетов, будет определена по формуле:

$$h_3 = h - h_1 - h_2, \quad (7)$$

Расчетные значения слоя поверхностного стока, полученные по предлагаемой модели были сопоставлены авторами по экспериментальным данным. Условия проведения опытного эксперимента были следующие. Почвы опытного участка представлены темно-каштановыми среднесуглинистыми по гранулометрическому составу. Влажность при наименьшей полевой влагоемкости – 0,29, влажность полного насыщения – 0,45, влажность максимальной гигроскопичности – 0,07. Коэффициент фильтрации с поверхности почвы – 0,2 м/сут. Полив осуществлялся дождевальной машиной ДМ-394-80 «Фрегат» со средней интенсивностью дождя 0,27 мм/мин [12].

Сравнение экспериментальных и расчетных данных образования поверхностного стока при поливе дождеванием приведены в таблице.

**Сравнительный анализ величин образования поверхностного стока при поливе дождеванием, полученных в результате полевого эксперимента и рассчитанных с помощью предлагаемой модели.**

Предполивная влажность почвы, доли от наименьшей влагоемкости	Поливная норма, м <sup>3</sup> /га	Средний сток за полив, м <sup>3</sup> /га (по экспериментальным данным)	Расчетный сток, м <sup>3</sup> /га (по предлагаемой модели)	Расхождение, %
0,7	600	120	178	33
0,6	800	170	188	10
0,6	600	65	89	27
0,5	600	15	23	35

## Выводы

Представлена модель образования поверхностного стока при поливе дождеванием, учитывающая гидрофизические показатели почвы. Предложенная модель отражает реальную обстановку при поливе с помощью современных дождевальных машин и применима во всех зонах орошаемого земледелия. Полученные расчетные величины по предлагаемой модели вполне сопоставимы с экспериментальными данными. Представляется актуальным проведение широкой апробации модели на имеющемся экспериментальном материале и ее адаптации к конкретным почвенным и технологическим условиям.

1. Раткович Л. Д., Беглярова Э. С., Козлов Д. В., Шабанов В. В. Использование водных ресурсов в условиях современного развития водохозяйственного комплекса // Мелиорация и водное хозяйство. – 2005. – № 5. – С. 53.

2. Краснощеков В. Н., Журавский П. П., Семендуев В. А. Повышение эколого-экономической устойчивости функционирования агроландшафтов // Природообустройство. – 2013. – № 1. – С. 89–95.

3. Агроэкологические режимы орошения кормовых культур в условиях Заволжья для лет различной расчетной обеспеченности / А. В. Кравчук [и др.] // Системные исследования природно-техногенных комплексов Нижнего Поволжья: сб. науч. работ. – Саратов: ООО Издательский центр «Наука», 2007. – Вып. 2. – С. 92–95.

4. Прокопец Р. В., Овчинников А. Б. Ресурсосберегающие технологии орошения кормовых культур на темно-каштановых почвах Поволжья // Научная жизнь. – 2012. – № 4. – С. 81–86.

5. Математические зависимости слоя поверхностного стока от величины поливной нормы / А. В. Кравчук [и др.] // Основы рационального природопользования: Мат. II межд. научно-практ. конф. (ФГОУ ВПО Саратовский ГАУ). – Саратов.: Издательский центр «Наука», 2009. – С. 206–210.

6. Серебренников Ф. В. Построение модели впитывания воды при поверхностном поливе с учетом гидрофизических свойств почвы //

Аграрная наука в XXI веке: проблемы и перспективы: Материалы V Всероссийской научно-практической конференции (ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ»). – Саратов.: ООО Издательство «КУБиК», 2011. – С. 238–240.

7. Снижение потерь поливной воды при орошении [Текст] / М. С. Григоров [и др.] // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2003. – № 6. – С. 55–56.

8. Серебренников Ф. В. Критическая оценка модели водоудерживания и влажностной характеристики влагопроводности Ван Генухтена // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2012. – № 09. – С. 54–56.

9. Прокопец Р. В., Серебренников Ф. В. Модель поверхностного стока при поливе дождеванием с учетом гидрофизических свойств почвы // Наука и технологии в современном обществе: материалы Международной научно-практической конференции (Уфа, 28–29 марта 2014 г.): в 2-х ч. Часть I. – Уфа: РИО ИЦИПТ, 2014. – С. 144–148.

10. Никольский Ю. Н. Учет водно-физических характеристик почв для расчета режима орошения осушаемых земель // Сб. науч. тр. В/О «Союзводпроект», 1979. – № 52. – С. 77–85.

11. Серебренников Ф. В. Исследование одномерной модели впитывания воды в почву при поливе дождеванием // Научное обозрение. – 2011. – № 5. – С. 168–171.

12. Прокопец Р. В. Водосберегающие режимы орошения козлятника восточного на темно-каштановых почвах Саратовского Заволжья: дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02. – Саратов, 2003. – 185 с.

Материал поступил в редакцию 16.06.2014.

*Прокопец Роман Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Природообустройство и водопользование*  
E-mail: proroman@inbox.ru

*Серебренников Федор Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Природообустройство и водопользование»*

E-mail: fvser2013@gmail.ru