

УДК 502/504 : 631.674.1

## ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНОГО ПОЛИВА ПО БОРОЗДАМ

Поступила 05.06.2017 г.

© **Терпигорев Анатолий Анатольевич, Зверьков Михаил Сергеевич**Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Всероссийский научно-исследовательский институт «Радуга», Коломна, Россия

## THE BASIC METHODS OF RATIONAL JUSTIFICATION ELEMENTS OF THE TECHNOLOGY OF SURFACE IRRIGATION BY FURROWS

Received on June 05, 2017

© **Terpigorev Anatolii Anatolevich, Zverkov Mikhail Sergeevich**<sup>1</sup> Federal state budgetary scientific institution «All-Russian scientific research Institute «Raduga», Kolomna, Russia

Одной из главных задач при механизированном поверхностном орошении является обеспечение равномерности распределения поливной нормы по длине борозды, сокращение конечных сбросов и снижение потерь воды на глубинные утечки. Величины элементов техники бороздкового полива назначают исходя из водопроницаемости почв, уклона поверхности поля, величины поливной нормы для создания влагозапасов в расчетном слое почвы, определяющим развитие основной массы корневой системы растений и технологии их возделывания. Рассматриваются различные подходы к обоснованию рациональных элементов технологии поверхностного орошения. Наиболее подходящими для решения вопроса обоснования рациональных элементов технологии поверхностного орошения являются балансовые уравнения. Приводятся примеры балансовых уравнений на основе теории инфильтрационного впитывания, разработанные А.Н. Костяковым. Предлагается в качестве возможного решения форма балансового уравнения передвижения воды по борозде и впитывания поливной нормы. Предполагается, что предложенная зависимость позволит упростить подход к назначению рациональных параметров элементов водосберегающей механизированной технологии бороздкового полива для конкретных производственно-хозяйственных условий обеспечения равномерности увлажнения почвы по длине поливных борозд не ниже 0,7...0,8 и обосновать требования к техническим средствам орошения.

Ключевые слова: поверхностное орошение, полив по бороздам, равномерность увлажнения, поливная норма, балансовое уравнение, уравнение А.Н. Костякова.

**Введение.** Одной из главных задач при поверхностном орошении по бороз-

дам является обеспечение равномерности распределения поливной нормы по

One of the main tasks in mechanized surface irrigation is to ensure the uniformity of distribution of irrigation norms along the length of the furrow, reducing the limit of discharges and reducing water losses to deep spillage. The magnitude of the technical elements of furrow irrigation is prescribed on the basis of permeability of soils, slope of the field surface, the value of irrigation norms to create the moisture reserves in the calculation of the soil, determining the development of the main mass of the root system of plants and technologies of their cultivation. Discusses various approaches to substantiation of rational elements of the technology of surface irrigation. Most appropriate to address the issue of rational justification of the elements of the technology of surface irrigation are the balance equations. Examples of balance equations based on the theory of infiltration absorption, developed by A. N. Kostyakova. Offered as possible solutions to the form of balance equations of water movement in a furrow and absorption of irrigation norms. It is expected that the dependence will simplify the approach to the assignment of rational parameters of elements of the mechanized water-saving furrow irrigation technology for specific production and economic conditions for ensuring the uniformity of soil moisture along the length of irrigation furrows not less 0,7...0,8 and justify the requirements to the technical means of irrigation.

Keywords: surface irrigation in furrow irrigation, the uniformity of moisture, irrigation rate, balance equation, A. N. Kostyakov's equation.

дам является обеспечение равномерности распределения поливной нормы по

длине поливных борозд и сокращения конечных сбросов. От равномерности увлажнения почвы, как известно, зависит эффективность полива.

Элементами технологии полива по бороздам являются длина поливных борозд  $l$ , площадь их поперечного сечения  $A$ , расход воды в борозду  $q$  и продолжительность полива  $t$ . При движении воды по борозде одновременно происходит впитывание ее в почву. С позиции теории движения жидкости процесс движения воды по борозде характеризуют как движение неустановившегося потока переменной массы с неравномерной раздачей расхода вдоль пути, ограниченное предельной длиной борозды  $l_{\text{lim}}$ . Предельная длина  $l_{\text{lim}}$  борозды устанавливается в зависимости от условий впитывания подаваемого расхода [1]:

$$l_{\text{lim}} = q_{\text{lim}} / (\chi \mu k_{\text{st}}), \quad (1)$$

где  $q_{\text{lim}}$  – предельный расход воды в борозду, л/с;  $\chi$  – смоченный периметр в голове борозды, м;  $\mu$  – коэффициент, учитывающий уменьшение смоченного периода по длине борозд;  $k_{\text{st}}$  – установившаяся скорость впитывания воды в почву, мм/с.

Основные трудности в практическом решении этой задачи возникают при определении установившейся скорости  $k_{\text{st}}$ , но и текущей скорости впитывания воды в почву. От этих показателей зависит равномерность увлажнения корнеобитаемой зоны, величина подаваемых объемов воды и их полезное использование. Другая трудность состоит в том, что в формуле (1) не учитываются потери воды на испарение, а их величины для сухих степей могут достигать от 10 до 100 м<sup>3</sup>/га в сутки [2]. Поэтому в процессе полива оперируют не предельной длиной поливной борозды, а только ее частью, на которой процесс увлажнения почвы практически не выходит за пределы наступления периода фильтрации. Продолжительность добега воды в борозде на заданную длину определяют по уравнению А.Н. Костякова:

$$t_{\text{доб}} = \left[ \frac{f_{\text{cp}} n k_1 l}{(1 - \alpha) q_0} \right]^{1/\alpha},$$

где  $t_{\text{доб}}$  – продолжительность добега струи до конца борозды;  $f_{\text{cp}}$  – активная ширина поглощения воды в борозде;  $n$  – коэффициент, учитывающий накопление воды в борозде;  $q_0$  – расход воды в голове борозды;  $l$  – длина борозды;  $\alpha$ ,  $k_1$  – параметры кривой впитывания.

Эта формула получила наибольшее распространение в отечественной и зарубежной практике. Однако из приведен-

ной зависимости следует, что впитывание поданного расхода воды происходит на всей длине борозды без учета скорости ее продвижения. Другим недостатком формулы является необходимость определения параметров, получение которых возможно только при проведении полевых исследований или доверять их схожести на конкретном участке. На практике для сокращения времени используют пробные поливы, в результате чего определяют продолжительность продвижения воды по борозде на конкретном участке:

$$l = v_0 t_{\text{доб}}^\gamma,$$

где  $v_0$  – скорость движения воды по сухой борозде за первую единицу времени;  $\gamma$  – коэффициент замедления скорости продвижения воды по сухой борозде.

Однако, по мнению ряда авторов [3, 4, 5], применение формулы (1) для определения длины борозд дает превышение значений  $l$ , в результате чего образуется или чрезмерный сброс оросительной воды в конце борозды или снижение коэффициента равномерности увлажнения почвы до 0,6...0,7.

**Методы обоснования рациональных элементов технологии поверхностного орошения.** В настоящее время существует несколько основных методов теоретического обоснования рациональных элементов технологии поверхностного орошения. Экспериментально установлено, что применение формулы А.Н. Костякова для условий поверхностного орошения по бороздам требует уточнение. Начало впитывания  $\tau$  в каждой точке по длине борозды наступает спустя некоторое время  $t_1$  после начала движения воды  $t$ , то есть в момент «добега» струи в эту точку [6, 7]:

$$\tau = t - t_1.$$

Abdelmonem M. Amer и Kamal H. Amer в [8] предложили также учитывать «recession time» – время  $t_r$  полного впитывания воды в почву или время спада («сработки») уровня воды в борозде:

$$\tau = t + t_r - t_1.$$

Формула для определения скорости впитывания воды в почву, предложенная А.Н. Костяковым, имеет следующий вид:

$$k = k_1 T^{-\alpha}, \quad (2)$$

где  $k$  – скорость впитывания воды в почву в момент времени  $T$ , мм/мин;  $k_1$  – скорость впитывания в конце первого

часа, мм/мин;  $\alpha$  – эмпирический коэффициент затухания скорости впитывания, зависящий от типа почвы и ее влажности.

Walker W.R. (2005) уточнил формулу А.Н. Костякова, которая также носит название формулы Костякова-Льюиса и имеет следующий вид [9]:

$$z = k\tau^\alpha + f_0\tau, \quad (3)$$

где  $z$  – удельный объем впитавшейся воды, приходящийся на единицу длины поля,  $\text{м}^3\text{м}^{-1}$ ;  $\alpha$  – эмпирический коэффициент (тот же, что и в формуле А.Н. Костякова) затухания скорости впитывания, зависящий от типа почвы и ее влажности;  $k$  – эмпирический постоянный коэффициент, численно равный  $k_1$  в формуле А.Н. Костякова, но имеющий размерность  $\text{м}^2\text{м}^{-1}/\text{мин}^{-\alpha}$ ;  $f_0$  – эмпирический постоянный коэффициент, называемый «установившейся скоростью впитывания»,  $\text{м}^2\text{м}^{-1}/\text{мин}$ ;  $\tau$  – время с начала впитывания, мин.

Установлено, что при  $f_0 = 0$  значения, полученные по выражению (3) Костякова-Льюиса, численно равны скорости впитыванию воды в почву по классической формуле (2) А.Н. Костякова [10].

Аналогичную формулу предложил Н.Ф. Сазыкин, в которой процесс фильтрации и инфильтрации разделены:

$$k_t = k_1 t^{-\alpha} + k_\phi.$$

Из уравнения видно, что  $k_\phi$  не связан с параметрами  $k_1$  и  $\alpha$ . Однако известно, что почвогрунты различного механического состава и водопроницаемости имеют свой, присущий им, коэффициент фильтрации. Если рассмотреть процесс впитывания воды почвой с позиции последовательного промачивания ее слоев, когда макропоры заполнены водой (режим инфлюкции) откуда вода поступает в капилляры почвы, вытесняя из них воздух, и перемещается по ним (режим инфильтрации). В этот период каждый выше лежащий слой толщиной соизмеримой с гранулометрическим составом работает если не в режиме фильтрации, то достаточно близким к нему. Отсюда следует, что в первую единицу времени инфильтрационного впитывания параметр  $k_\phi$  присутствует в зависимости от величины первой единицы времени.

Для участков с малыми уклонами может быть использована EVALUЕ-модель (Strelkoff T.S. и др., 1999), уравнения которой точно описывают впитывание воды в растрескавшиеся глинистые (такры) и свежеспаханные почвы. Модель позволяет оценить зна-

чение коэффициента Маннинга (коэффициент шероховатости поверхности борозды  $n$ ) и параметры формулы (3) Костякова-Льюиса:

$$\{ z = c + k\tau^\alpha \text{ при } \tau \leq \tau_B;$$

$$\{ z = c_B + b\tau^\alpha \text{ при } \tau > \tau_B,$$

где  $c$ ,  $c_B$  и  $b$  – эмпирические константы,  $\text{м}^3\text{м}^{-1}/\text{мин}$  и  $\text{м}^2\text{м}^{-1}/\text{мин}^{-\alpha}$  соответственно;  $\tau_B$  – пороговое значение времени с начала впитывания для данных почв, мин.

Математическая модель в частных дифференциалах, описывающая процесс движения и впитывания воды в борозду, основанная на сохранении массы (уравнения Сен-Венана), имеет следующий вид [11]:

$$\frac{\delta A}{\delta t} + \frac{\delta q}{\delta l} + \frac{\delta z}{\delta \tau} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{1}{Ag} \frac{\delta q}{\delta t} + \frac{2q}{A^2 g} \frac{\delta q}{\delta l} + \left( 1 - \frac{q^2 d}{A^3 g} \right) \frac{\delta h}{\delta l} - i_0 + i_f = 0, \quad (5)$$

где  $A$  – площадь живого сечения потока в борозде,  $\text{м}^2$ ;  $q$  – расход воды в борозде,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $z$  – впитывание воды в почву,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $t$  – время от начала полива (движения воды),  $\text{с}$ ;  $l$  – длина борозды (расстояние до рассматриваемого створа борозды),  $\text{м}$ ;  $\tau$  – время с начала впитывания,  $\text{с}$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $d$  – ширина верхнего «уреза» воды в рассматриваемом створе борозды,  $\text{м}$ ;  $h$  – глубина потока воды в рассматриваемом створе борозды,  $\text{м}$ ;  $i_0$  – уклон дна борозды;  $i_f$  – уклон свободной поверхности потока воды в борозде.

Выражения (4) и (5) не позволяют полностью учесть все факторы, влияющие на условия впитывания и движение воды по борозде. Имитационное моделирование с учетом всех факторов возможно только при использовании всех уравнений Сен-Венана. Теоретические уравнения Сен-Венана также являются основой для верификации и оценки точности более простых моделей, в том числе (4) и (5) [12].

Однако практического применения выражения (4) и (5), по-видимому, не находят, так как не позволяют собрать необходимый объем исходной информации для имитационного моделирования. Решение этих уравнений трудоемко, хотя и возможно с использованием современных компьютерных программ. С этой целью исследователи и практики используют балансовые уравнения. Решения этих уравнений направлены на поиск оптимальных условий увлажнения борозды.

Лактаевым Н.Т. [5] для расчетов параметров использовалась балансовая модель (балансовое уравнение расхода):

$$qt = a \int_0^x m(x)dx + \omega x, \quad (6)$$

где  $a$  – ширина междурядий (от гребня до гребня), м;  $\omega$  – осредненная площадь живого сечения потока, м<sup>2</sup>;  $t$  – продолжительность пуска воды в борозду, с;  $m$  – поливная норма или слой впитавшейся воды в борозду в данном сечении (створе);  $q$  – расход воды в борозду;  $x$  – расстояние от начала борозды до данного створа, м.

Лактаев Н.Т. решал это уравнение исходя из требований обеспечения требуемой максимальной производительности. Такая постановка задачи предполагает определение оптимальной длины  $l_{lim}$  борозды с одной стороны в зависимости от условий впитывания подаваемого расхода, а с другой – требует удлинения длины борозды из условия максимально возможного расстояния «добегания» струи воды. Анализ выражения (6) в таком случае свидетельствует, что технологическая равномерность увлажнения борозды (0,7...0,8) обеспечена не будет.

А.А. Терпигорев при исследовании впитывания воды в почву при бороздковом поливе использовал зависимость для поливной нормы  $m$  от параметра  $a$  формулы А.Н. Костякова:

$$m = m_1 t^{1-a}, \quad (7)$$

где  $m_1$  – поливная норма, впитавшаяся в первую единицу времени, м<sup>3</sup>/га;  $(1-a)$  – коэффициент затухания впитывания объемов воды.

В формуле (6) очевидно, что осредненная площадь живого сечения потока  $\omega$  является интегральной функцией.

Похожие балансовые уравнения встречаются во многих работах, например [10, 13]:

$$qt = \int_0^x \omega(x, t)dx + \int_0^x z(x, t)dx,$$

где  $t$  – продолжительность пуска воды в борозду, с;  $q$  – расход воды в борозду;  $x$  – расстояние от начала борозды до данного створа, м;  $\omega$  – площадь поперечного сечения потока, м<sup>2</sup>, зависящая от времени  $t$  и определяемая в данном створе  $x$ ;  $z$  – площадь поперечного контура увлажнения, м<sup>2</sup>, зависящая от времени  $t$  и определяемая в данном створе  $x$ .

### Заключение

Авторами данной статьи предлагается для имитационного моделирования бороздкового полива в целях обоснования рациональных элементов технологии орошения формулу (6) использовать в виде:

$$q(t - t_1) = a \int_0^l m(l)dl + \int_0^l \omega dl, \quad (8)$$

где  $a$  – ширина междурядий (от гребня до гребня), м;  $\omega$  – осредненная площадь живого сечения

потока, м<sup>2</sup>;  $t$  – продолжительность пуска воды в борозду, с;  $t_1$  – момент «добегания» струи в точку  $l$ , с;  $m$  – поливная норма или слой впитавшейся воды в борозду в данном сечении (створе);  $q$  – расход воды в борозду;  $l$  – расстояние от начала борозды до данного створа, в котором будет обеспечена равномерность увлажнения 0,7...0,8, м.

При этом в качестве функции  $m(l)$  может быть использовано уточненное выражение (7):

$$m(l) = m_1 \tau^{1-a},$$

где  $\tau$  – время начала впитывания в точке  $l$ , которое наступает спустя некоторое время  $t_1$  после начала движения воды  $t$ , то есть в момент «добегания» струи в эту точку.

Значения коэффициента  $(1-a)$  получены А.А. Терпигоревым для различных почв [14].

Аналізу выражения (8) будут посвящены дальнейшие исследования авторов. Предполагается, что предложенная зависимость позволит упростить подход к назначению рациональных параметров элементов водосберегающей механизированной технологии бороздкового полива из условия обеспечения равномерности увлажнения почвы по длине поливных борозд не ниже 0,7...0,8 и обосновать требования к техническим средствам орошения.

### Библиографический список

1. Мелиорация и водное хозяйство. Орошение: Справочник / Под ред. Б.Б. Шумакова. – М.: Колос, 1999. – 432 с.
2. Лактаев Н.Т. Теоретическое обоснование технологии полива сельскохозяйственных культур по бороздам. Техника полива сельскохозяйственных культур. – М.: Колос, 1977. – С. 68-83.
3. Strelkoff T.S., Clemmens A.J., El-Ansary M., Awad M. Surface irrigation evaluation models: application to level basin in Egypt // Transactions of the American Society of Agricultural Engineers – 1999. – Vol. 42(4). – P. 1027-1036.
4. Walker W.R. Multilevel calibration of furrow infiltration and roughness // Journal Irrig Drain Eng. – 2005. – Vol. 131(2). – P. 129-136.
5. Мелиорация земель / Под ред. А.И. Голованова. – М.: КолосС, 2011. – 824 с.
6. Лактаев Н.Т. Полив хлопчатника. – М.: «Колос», 1978. – 176 с.
7. Kannan N., Abate B. Studies on hydraulic performance of furrow irrigation to optimise design parameters

suitable to onion field in Hawassa, Ethiopia // *Water Utility Journal*. – 2015. – Vol. 11. – P. 17-30.

8. *Abdelmonem M. Amer u Kamal H. Amer*. Surface Irrigation Management in Relation to Water Infiltration and Distribution in Soils // *Soil & Water Res.* – 2010. – Vol. 5 (3). – P. 75-87.

9. *Ramezani Etedali H., Ebrahimian H., Abbasi F., Liaghat A.* Evaluating models for the estimation of furrow irrigation infiltration and roughness // *Span J Agric Res.* – 2011. – Vol. 9(2). – P. 641-649.

10. *Sorousha F., Fentonb J.D., Mostafazadeh-Farda B., Mousavi S.F., Abbasi F.* Simulation of furrow irrigation using the Slow-change/slow-flow equation // *Agricultural Water Management*. – 2013. – Vol. 116. – P. 160-174.

11. *Ebrahimian H., Liaghat A.* Field Evaluation of Various Mathematical Models for Furrow and Border Irrigation Systems // *Soil & Water Res.* – 2011. – Vol. 6 (2). – P. 91-101.

12. *Bautista E., Wallender W.W.* Hydrodynamic furrow irrigation model with specified space steps // *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. – 1992. – Vol. 118. – P. 450-465.

13. *Mohammad Valipour, Ali Asghar Montazar.* An Evaluation of SWDC and WinSRFR Models to Optimize of Infiltration Parameters in Furrow Irrigation // *American Journal of Scientific Research*. – 2005. – Issue 69 (2012). – P. 128-142.

14. Ресурсосберегающие энергоэффективные экологически безопасные технологии и технические средства орошения: справ. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2015. – 264 с.

#### Сведения об авторах

**Терпигорев Анатолий Анатольевич**, кандидат технических наук; заведующий отделом; Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт «Радуга»; 140483 Московская обл., Коломенский район, пос. Радужный, д. 38.

**Зверьков Михаил Сергеевич**, кандидат технических наук; Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт

«Радуга»; 140483 Московская обл., Коломенский район, пос. Радужный, д. 38; e-mail: mzverkov@bk.ru.

#### References

1. Melioracija i vodnoe hozjajstvo. Oroshenie: Spravochnik / Pod red. B.B. Shumakova. – M.: Kolos, 1999. – 432 s.

2. *Laktaev N.T.* Teoreticheskoe obosnovanie tehnologii poliva sel'skoho-zjajstvennyh kul'tur po borozdam. Tehnika poliva sel'skoho-zjajstvennyh kul'tur. – M.: Kolos, 1977. – S. 68-83.

3. *Strelkoff T.S., Clemmens A.J., El-Ansary M., Awad M.* Surface irrigation evaluation models: application to level basin in Egypt // *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* – 1999. – Vol. 42(4). – P. 1027-1036.

4. *Walker W.R.* Multilevel calibration of furrow infiltration and roughness // *Journal Irrig Drain Eng.* – 2005. – Vol. 131(2). – P. 129-136.

5. Melioracija zemel' / Pod red. A. I. Golovanova. – M.: KolosS, 2011. – 824 с.

6. *Laktaev N.T.* Poliv hlopchatnika. – M.: «Kolos», 1978. – 176 s.

7. *Kannan N., Abate B.* Studies on hydraulic performance of furrow irrigation to optimise design parameters suitable to onion field in Hawassa, Ethiopia // *Water Utility Journal*. – 2015. – Vol. 11. – P. 17-30.

8. *Abdelmonem M. Amer i Kamal H. Amer*. Surface Irrigation Management in Relation to Water Infiltration and Distribution in Soils // *Soil & Water Res.* – 2010. – Vol. 5 (3). – P. 75-87.

9. *Ramezani Etedali H., Ebrahimian H., Abbasi F., Liaghat A.* Evaluating models for the estimation of furrow irrigation infiltration and roughness // *Span J Agric Res.* – 2011. – Vol. 9(2). – P. 641-649.

10. *Sorousha F., Fentonb J.D., Mostafazadeh-Farda B., Mousavi S.F., Abbasi F.* Simulation of furrow irrigation using the Slow-change/slow-flow equation // *Agricultural Water Management*. – 2013. – Vol. 116. – P. 160-174.

11. *Ebrahimian H., Liaghat A.* Field Evaluation of Various Mathematical Models for Furrow and Border Irrigation Systems // *Soil & Water Res.* – 2011. – Vol. 6 (2). – P. 91-101.

12. *Bautista E., Wallender W.W.* Hydrodynamic furrow irrigation model with specified space steps // *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. – 1992. – Vol. 118. – P. 450-465.

13. *Mohammad Valipour, Ali Asghar Montazar.* An Evaluation of SWDC and WinSRFR Models to Optimize of Infiltration Parameters in Furrow Irrigation // *American Journal of Scientific Research*. – 2005. – Issue 69 (2012). – P. 128-142.

14. Resursosberegajushhie jenergojeffektivnye jekologicheski bezopasnye tehnologii i tehniczeskie sredstva oroshenija: sprav. – M.: FGBNU «Rosinformagroteh», 2015. – 264 s.

#### *Information about the authors*

**Terpigorev Anatolii Anatolevich**, candidate of technical sciences, head of department; Federal state budgetary scientific institution «All-Russian scientific research Institute «Raduga»; 140483, Moscow region, Kolomna district,

Raduzhnyj, 38.

**Zverkov Mikhail Sergeevich**, candidate of technical sciences; Federal state budgetary scientific institution «All-Russian scientific research Institute «Raduga»; 140483, Moscow region, Kolomna district, Raduzhnyj, 38; e-mail: mzverkov@bk.ru.

*Для цитирования: Терпигорев А.А., Зверьков М.С.* Основные методы обоснования рациональных элементов технологии поверхностного полива по бороздам // *Экология и строительство*. – 2017. – № 2. – С. 25–30.

*For citations: Terpigorev A.A., Zverkov M.S.* The basic methods of rational justification elements of the technology of surface irrigation by furrows // *Ekologiya & Stroitelstvo*. – 2017. – № 2. – P. 25–30.