

УДК 502/504 : 633.854.54 : 631.674.6

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К ВОПРОСУ О ПЕРЕДВИЖЕНИИ ВЛАГИ В ПОЧВЕ ПРИ КАПЕЛЬНОМ ОРОШЕНИИ

Поступила 10.11.2016 г.

© **Адамушко Надежда Николаевна, Зверьков Михаил Сергеевич**

Коломенский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет», г. Коломна, Россия

THE MATHEMATICAL PRESUPPOSITION FOR THE ISSUE OF THE SOIL MOISTURE MOVEMENT UNDER DRIP IRRIGATION

Received on November 10, 2016

© **Adamushko Nadezhda Nikolaevna, Zverkov Mikhail Sergeevich**

Kolomna Institute of Moscow Polytechnic University, Kolomna, Russia

В статье рассматриваются математические зависимости для описания процесса передвижения влаги при капельном орошении. В Федеральной целевой программе «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014–2020 годы» поставлена задача экономии воды. Одной из таких водосберегающих технологий является капельное орошение. Этот способ полива получил широкое распространение в различных странах мира. Отмечается, что точность и эффективность регулирования водного режима определяется частыми и как можно меньшими нормами полива. Указывается, что применение на практике традиционных способов расчета режима капельного орошения вызывает у сельхозпроизводителей много вопросов. При отсутствии инженеров-мелиораторов на производстве аграрии не могут применять разработанные в большом количестве в последнее время рекомендации и вынуждены самостоятельно устанавливать режим подачи воды, из-за этого снижается эффективность использования систем капельного орошения. Показано, что наблюдения за передвижением влаги с помощью балансового метода при капельном орошении является затруднительным. Отмечается, что многочисленными исследованиями показана высокая точность и эффективность расчета режимов орошения с помощью моделей влагопереноса, среди которых наибольшее распространение получили зависимости на основе выражения Л. Ричардса.

Ключевые слова: влагоперенос, капельное орошение, почва, микроорошение, водосберегающие технологии, мелиорация.

Введение. В Федеральной целевой программе «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014–2020 годы» поставлена

The article discusses a mathematical models to describe the process of movement of moisture with drip irrigation. In the Federal target program «Development of reclamation of agricultural lands of Russia for 2014–2020» the task is saving water. One such water-saving technologies is drip irrigation. This method of irrigation is widespread in different countries of the world. It is noted that the accuracy and effectiveness of the regulation of the water regime is defined as frequent and less watering. Indicates that the application in practice of traditional methods of calculation of drip irrigation causes farmers a lot of questions. In the absence of engineers, reclamation specialists on the production of farmers can not apply developed in a large number of recent recommendations and are forced to set their own water supply mode, because of this reduced efficiency in the use of drip irrigation systems. It is shown that observation of the movement of moisture using the balance method with drip irrigation is difficult. It is noted that numerous studies have shown the high accuracy and efficiency the calculation of irrigation regimes using models of moisture transport, among which the most widespread are based on the basis of an expression L. Richards.

Keywords: water transfer, drip irrigation, soil, micro irrigation, water saving technologies, land reclamation.

задача экономии воды. Достижение указанной цели предполагается за счет проведения мероприятий, направленных на повышение коэффициента полезного действия мелиоративных систем, внед-

рение микроорошения и водосберегающих аграрных технологий. Одной из таких водосберегающих технологий является капельное орошение.

Этот способ полива получил широкое распространение в Израиле, США, Бразилии, Испании, Мексике, Великобритании, Нидерландах, Германии и ряде других стран [1]. В Египте, например, с помощью капельниц орошают не только аграрный сектор, но и городские газоны и клумбы (рисунок 1). В Японии наибольшее распространение капельное орошение получило для полива культур закрытого грунта [2]. Широкое распространение капельное орошение получило в Индии, где его применение поддерживает правительство страны [3].



Рис. 1. Капельное орошение в Шарм-эш-Шейхе (Египет, фотография авторов)

Существующие способы расчета режима капельного орошения. Анализ существующих подходов [4–8] для расчета режимов капельного орошения показал, что методики носят как правило эмпирический характер и применимы исключительно для конкретных данных почвенно-климатических условий и культуры. Унифицированные способы расчета, основанные на уравнении водного баланса орошаемого поля, дают явно завышенные оросительные нормы. Причем в условиях сельскохозяйственного производства, когда традиционный план орошения постоянно корректируется текущими метеорологическими условиями, оросительная норма носит исключительно проектный или прогнозный характер. Поливные нормы, получаемые с использованием

модифицированной формулы А. Н. Костякова, не учитывают характер распределения влаги в почве при капельном орошении. Последнее очень важно в условиях платного водопользования и рационального природопользования, хотя возможно на первый взгляд связь неочевидна.

$$M = -W_a - \alpha \cdot P + E,$$

где $-W_a$ – активные влагозапасы в почве (в объеме контура увлажнения), $\text{м}^3/\text{га}$; P – количество осадков за вегетационный период, $\text{м}^3/\text{га}$; α – коэффициент использования осадков зависит от частоты и обильности их выпадения; E – суммарное водопотребление растений, $\text{м}^3/\text{га}$; M – оросительная норма, $\text{м}^3/\text{га}$.

Оросительная норма является валовым показателем, – суммой поливных норм:

$$M = \sum_{i=1}^n m_i,$$

где M – оросительная норма, $\text{м}^3/\text{га}$; m – поливная норма, $\text{м}^3/\text{га}$; i – порядковый номер полива; n – число поливов за вегетацию.

Капельное орошение отличается от других способов полива тем, что вода подается локально, малыми расходами непосредственно к каждому растению. Такой способ полива позволяет не тратить воду на увлажнение междурядий (площадь между грядками, гребнями). При расчете поливных норм необходимо учитывать это обстоятельство. Поэтому при расчетах поливных норм при капельном орошении вводят поправку на увлажняемую площадь (рис. 2), которая учитывает снижение поливной нормы:

$$m_{nt,i} = A_{nt} \cdot m_{nt,i}^*, \quad (1)$$

где $m_{nt,i}^*$ – поливная норма в случае увлажнения всего массива орошения, $\text{м}^3/\text{га}$; A_{nt} – коэффициент увлажняемой площади в долях от производственной (посадочной).



Рис. 2. Схематичный (приблизительный) контур увлажнения, не учитывающий характерных особенностей всех типов почв и гранулометрического состава

Кроме того, урожайность и режим орошения сельскохозяйственных культур во всех посвященных этому вопросу

работах связывают с определенным диапазоном наименьшей влагоемкости ($\theta_{\text{НВ}}$) почвы [4–6]. Для расчета поливной нормы m наибольшее распространение в России получила зависимость А. Н. Костякова [9–11], которая для условий капельного орошения имеет следующий вид:

$$m = 100 H \rho (\theta_{\text{НВ}} - \theta_{\text{min}}) F_{\text{nt}}, \quad (2)$$

где H – глубина увлажнения, м; ρ – плотность расчетного слоя почвы, т/м³; $\theta_{\text{НВ}}$ – наименьшая влагоемкость от массы абсолютно сухой почвы, д. ед.; θ_{min} – влажность почвы перед поливом, д. ед.; F_{nt} – площадь увлажнения под одним растением, м².

Анализ выражений (1) и (2) дает основание полагать, что применение этих выражений дает снижение оросительной, а как следствие и поливной нормы, но при этом не учитывается характер распределения влаги в почве (рис. 2). При таком решении задачи очевидно, что контур увлажнения приобретает форму цилиндра и расположен под каждой капельницей (в отличие от традиционного способа расчета, когда учитывается вся площадь орошения).

При капельном орошении образуются локальные зоны увлажнения, которые имеют форму эллипсоидов вращения, размеры которых зависят от интенсивности подачи воды, структуры почвы, гранулометрического состава, исходной влажности и других параметров. Сложность при такой постановке задачи возникает не столько от неизвестных параметров почвы, сколько от прогноза формы контура увлажнения. Очевидно, что последнее имеет первостепенное значение для качественного совпадения границ контура увлажнения, полученных опытным путем. На практике (в условиях действующего сельскохозяйственного производства) часто имеет место назначение сроков полива по внешним признакам растений, а объем поданной на капельное орошения воды не имеет обоснования. Так, в фермерском хозяйстве «ИП глава КФХ Бабунов Ю. А.», расположенного в городе Коломне Московской области, реализована технология капельного орошения картофеля сорта «рокко» [13]. При этом в хозяйстве отсутствуют планы проектного и текущего режимов орошения. Но такой подход вполне объясним. В этом и большинстве других хозяйств

часто отсутствуют сотрудники, ответственные за обоснование и соблюдение планов орошения. Поэтому в хозяйствах часто даже не встает вопрос: «сколько требуется воды для полива?».

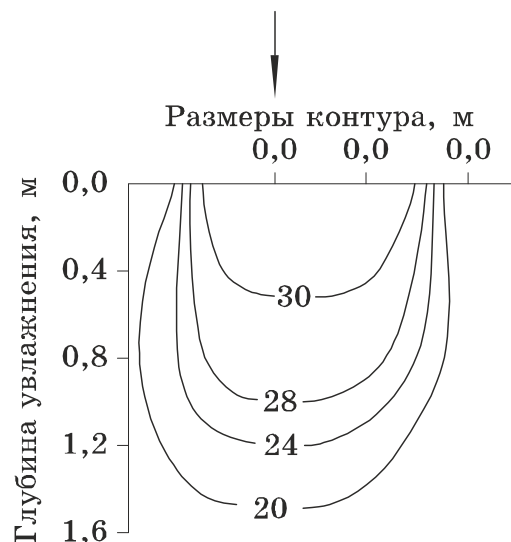


Рис. 3. Контур увлажнения по Д. М. Нурабаеву [15], полученный опытным путем, типичного лессовидного серозема при расходе воды в капельнице 2 л/ч и уклоне поверхности 0,12 (цифры на изолиниях контура увлажнения в % от объема)

Однако, целесообразность расчета режима орошения, в том числе и по экологическим соображениям, не нуждается в доказательствах. Можно предположить, что, зная геометрию контура увлажнения, легко определить тот объем воды, который необходимо подать каждому растению. Существует обоснованная теория влагопереноса. Сложные дифференциальные зависимости этой теории, как отмечено, например в [11, 12], легко решаются с помощью ЭВМ. Кроме того, возможно упрощение сложных зависимостей при учете параметров контуров увлажнения, полученных как опытным, так и расчетным путем.

В целом движение жидкости при неполном насыщении почвы можно описать законом Дарси. Многочисленными исследованиями показана высокая точность и эффективность расчета режимов орошения с помощью моделей влагопереноса. Наиболее распространенной зависимостью для решения задачи

переноса влаги является выражение Л. Ричардса [14]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[rk(h) \frac{\partial h}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k(h) \frac{\partial h}{\partial z} + k(h) \right],$$

где θ – объемная влажность почвы, $\text{см}^3/\text{см}^3$; h – напор почвенной влаги, см ; t – время, с ; r – горизонтальная координата контура увлажнения, см ; z – вертикальная координата контура увлажнения, см ; k – коэффициент влагопроводности, $\text{см}/\text{с}$.

Кроме того, существуют решения для обоснования режима капельного орошения с помощью конечно-разностного аналога дифференциального уравнения передвижения почвенной влаги и подземных вод по неявной схеме [16], исходя из баланса влаги в i, j блоке:

$$Cw_{i,j}^{n+1} \frac{H_{i,j}^{n+1} - H_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{H_{i,j-1}^{n+1} - H_{i,j}^n}{h_j R_{i,j-1}^B} - \frac{H_{i,j}^{n+1} - H_{i,j+1}^n}{h_j R_{i,j}^B} + \frac{H_{i-1,j}^{n+1} - H_{i,j}^n}{b_i R_{i-1,j}^r} - \frac{H_{i,j}^{n+1} - H_{i+1,j}^n}{b_i R_{i,j}^r} - e_{i,j}^n,$$

где $H_{i,j}^{n+1}$ – напор, м , на расчетный момент времени $n + 1$; $Cw_{i,j}^{n+1}$ – коэффициент влагоемкости, $\text{м}^3/\text{м}^4$; $R_{i,j}^B$ – вертикальное сопротивление потоку влаги между центрами i, j и $i, j + 1$ блоков, сут ; $R_{i,j}^r$ – горизонтальное сопротивление потоку влаги между центрами i, j и $i + 1, j$ блоков, сут ; h_j ($1 \leq j \leq Nx - 1$) – горизонтальные элементарные слои переменной толщины, от $0,1$ м вблизи поверхности до 1 м вблизи водоупора, $h_0 = h_{Nx} = 0$; b_i ($1 \leq i \leq Ny - 1$) – ширина расчетных блоков по длине катены $b_0 = b_{Ny} = 0$; $e_{i,j}$ – интенсивность отбора влаги корнями растений из единичного объема почвы, $\text{м}^3_{\text{в}}/\text{м}^3/\text{сут}$; Δt – время.

Заключение

Авторами данной статьи проведен краткий обзор математических зависимостей на основе теории влагопереноса. Сложность решения этих зависимостей заключается в правильной постановке задачи и выборе краевых или граничных условий влагопереноса. После выбора этих условий возможно упрощение этих зависимостей. Получение решения с помощью ЭВМ и приближенного аналитического решения одной из этих зависимостей являются предметом дальнейших исследований авторов.

Библиографический список

1. Гурова Т. А., Зверьков М. С. О влиянии капельного орошения на почвы // Научные основы экологии, мелиорации и эстетики ландшафтов: материалы конференции. – Тула: «Гриф и К», 2010. – С. 189–192.
2. Irrigation in Asia in figures: FAO Water Reports. – Rome, 1999. – 236 p.
3. Drip irrigation in India. – New Delhi: INCID. 1994. – P. 1,75–79, 85 and 130–141.
4. Бхандари Б. Б. Капельное орошение репчатого лука на аллювиальных почвах юга Непала: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.02. – М., 2013. – 22 с.
5. Ашраф Е. М. Е. Обоснование режимов капельного орошения земляники на дерново-подзолистых почвах: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.02. – М., 2011. – 20 с.
6. Бурмистрова А. Ю. Регулирование водного режима почвы при капельном орошении плодовых питомников в Нечерноземной зоне: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 03.02.13, 06.01.02. – М., 2013. – 24 с.
7. Олексич В. Н., Скрипчинская Л. В. Определение суммарного водопотребления и величины оросительных норм интенсивных садов и виноградников на территории Молдавской ССР при капельном орошении // В кн.: Регулирование использования воды в народном хозяйстве. – М., 1981. – С. 44–54.
8. Rains D. Water and water management technology / Advances Food Producing Systems Arid Semiarid Lands, 1981. – P. 421–427.
9. Мелиорация и водное хозяйство. Орошение: Справочник / под ред. Б. Б. Шумакова. – М.: Колос, 1999. – 432 с.
10. Терпигорев А. А., Зверьков М. С. Методики расчета параметров режима капельного орошения // Сборник научных докладов IV-ой Международной (8-й Всероссийской) конференции молодых ученых и специалистов «Инновационные технологии и экологическая безопасность в мелиорации». – Коломна: Инлайт, 2012. – С. 121–128.
11. Современные перспективные водосберегающие способы полива в Нижнем Поволжье: монография / М. С. Григоров [и др.]. – Волгоград: ИПК

ФГОУ ВПО Волгоградская ГСХА «Нива», 2010. – 244 с.

12. *Поопишилова К.* Передвижение воды в почве при дождевании и капельном способе полива: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 06.01.03. – М., 1989. – 28 с.

13. *Зверьков М. С.* Капельное орошение на пойменных землях // Природообустройство. – 2012. – № 4. – С. 23–26.

14. *Richards L.* Capillary conduction of liquid in porous media // *Physics*. – 1931. – Vol. 1. – P. 318–333.

15. *Нурабаев Д. М.* Результаты исследования формирования зон увлажнения при капельном орошении крутосклонных земель // Комплексное мелиоративное регулирование: сб. науч. тр. – М.: МГМИ, 1989. – С. 19–25.

16. *Абдель-азим М. М.* Совершенствование методов расчета капельного орошения плодовых культур в условиях Египта: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02. – М., 2010. – 24 с.

Сведения об авторах

Адамушко Надежда Николаевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры; Коломенский институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет»; 140402, г. Коломна, ул. Октябрьской революции, д. 408; тел. +7(496)615-16-47.

Зверьков Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры; Коломенский институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет»; 140402, г. Коломна, ул. Октябрьской революции, д. 408; тел. +7(496)615-16-47.

References

1. *Gurova T. A., Zver'kov M. S.* O vlijanii kapel'nogo oroshenija na pochvu // *Nauchnye osnovy jekologii, melioracii i jestetiki landshaftov: materialy konferencii*. ц Tula: «Grif i K», 2010. ц S. 189ц192.

2. *Irrigation in Asia in figures: FAO Water Reports*. ц Rome, 1999. ц 236 p.

3. *Drip irrigation in India*. ц New Delhi: INCID. 1994. ц P. 1,75ц79, 85 and 130ц141.

4. *Bhandari B. B.* Kapel'noe oroshenie repchatogo luka na alljuvial'nyh pochvah juga Nepala: avtoref. dis. ... kand. s.-h. nauk: 06.01.02. – М., 2013. – 22 s.

5. *Ashraf E. M. E.* Obosnovanie rezhimov kapel'nogo oroshenija zemljaniki na dernovo-podzolistyh pochvah: avtoref. dis. ... kand. s.-h. nauk: 06.01.02. – М., 2011. – 20 s.

6. *Burmistrova A. Ju.* Regulirovanie vodnogo rezhima pochvy pri kapel'nom oroshenii plodovyh pitomnikov v Nechernozemnoj zone: avtoref. dis. ... kand. s.-h. nauk: 03.02.13, 06.01.02. – М., 2013. – 24 s.

7. *Oleksich V. N., Skripchinskaja L. V.* Opredelenie summarnogo vodopotreblenija i velichiny orositel'nyh norm intensivnyh sadov i vinogradnikov na territorii Moldavskoj SSR pri kapel'nom oroshenii // V kn.: *Regulirovanie ispol'zovanija vody v narodnom hozjajstve*. ц M., 1981. ц S. 44ц54.

8. *Rains D.* Water and water management technology / *Advances Food Producing Systems Arid Semiarid Lands*, 1981. ц P. 421ц427.

9. *Melioracija i vodnoe hozjajstvo. Oroshenie: Spravochnik / pod red. B. B. Shumakova*. ц M.: Kolos, 1999. ц 432 s.

10. *Terpigorev A. A., Zver'kov M. S.* Metodiki rascheta parametrov rezhima kapel'nogo oroshenija // *Sbornik nauchnyh dokladov IV-oj Mezhdunarodnoj (8-j Vserossijskoj) konferencii molodyh uchenyh i specialistov «Innovacionnye tehnologi i jekologicheskaja bezopasnost' v melioracii»*. ц Kolomna: Inlajt, 2012. ц S. 121ц128.

11. *Sovremennye perspektivnye vodosberegajushhie sposoby poliva v Nizhnem povolzh'e: monografija / M. S. Grigorov [i dr.]*. ц Volgograd: IPK FGOU VPO Volgogradskaja GSHA «Niva», 2010. ц 244 s.

12. *Poopishilova K.* Peredvizhenie vody v pochve pri dozhddevanii i kapel'nom sposobe poliva: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 06.01.03. – М., 1989. – 28 s.

13. *Zver'kov M. S.* Kapel'noe oroshenie na pojmyennyh zemljah // Prirodoobustrojstvo. № 2012. № 4. S. 23–26.

14. *Richards L.* Capillary conduction of liquid in porous media // Physics. 1931. Vol. 1. P. 318–333.

15. *Nurabaev D. M.* Rezul'taty issledovaniya formirovaniya zon uvlazhneniya pri kapel'nom oroshenii krutosklonnyh zemel' // Kompleksnoe meliorativnoe regulirovanie: sb. nauch. tr. – M.: MGMI, 1989. – S. 19–25.

16. *Abdel'-azim M. M.* Sovershenstvovanie metodov rascheta kapel'nogo orosheniya plodovyh kul'tur v uslovijah Egipta: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 06.01.02. – M., 2010. – 24 s.

Information about the authors

Adamushko Nadezhda Nikolaevna, candidate of physico-mathematical sciences, associate professor of the department; Kolomna Institute of Moscow Polytechnic

University; 140402, Moscow region, town Kolomna, ul. Oktyabrjskoy revolutsii, 408; phone +7(496)615-16-47.

Zverkov Mikhail Sergeevich, candidate of technical sciences, senior lecturer; Kolomna Institute of Moscow Polytechnic University; 140402, Moscow region, town Kolomna, ul. Oktyabrjskoy revolutsii, 408; phone +7(496)615-16-47.

Для цитирования: Адамушко Н.Н., Зверьков М.С. Математические предпосылки к вопросу о передвижении влаги в почве при капельном орошении // Экология и строительство. – 2016. – № 4. – С. 30–35.

For citations: Adamushko N.N., Zverkov M.S. The mathematical presupposition for the issue of the soil moisture movement under drip irrigation // Ekologiya & Stroitelstvo. – 2016. – № 4. – P. 30–35.