

Математическое моделирование процессов в агропромышленном комплексе и проблемы управления

УДК [631.43+004.65]

ПРЕИМУЩЕСТВА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО МЕТОДА МУАЛЕМА-ВАН ГЕНУХТЕНА НА ПРИМЕРЕ ГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ

В. В. Терлеев^{1,2}, В. Л. Баденко^{1,2}, А. Г. Топаж², В. Миршель³, И. Ю. Гусева¹¹Национальный исследовательский Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет

ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия

²ФГБНУ Агрофизический научно-исследовательский институт

Гражданский пр., 14, Санкт-Петербург, 195220, Россия

³Leibniz Centre of Agricultural Landscape Research (ZALF)

84, Eberswalder Strasse, Muencheberg, Germany, 15374

E-mail: Vitaly_Terleev@mail.ru

Поступила в редакцию 01 декабря 2014 г., принята к печати 10 декабря 2014 г.

Рассмотрены преимущества расчета отношения функции гидравлической проводимости почвы к коэффициенту фильтрации влаги усовершенствованным методом Муалема-Ван Генухтена, который опирается на физически обоснованное описание функции дифференциальной влагоемкости почвы и первообразной данной функции как основной гидрофизической характеристики почвы. К числу важнейших преимуществ усовершенствованного метода по сравнению с его оригинальной версией относятся: во-первых, возможность оценки физически интерпретированных параметров моделей водоудерживающей способности и гидравлической проводимости почвы по относительно доступным показателям физических свойств почвы; во-вторых, более высокая точность вычисления отношения функции гидравлической проводимости почвы к коэффициенту фильтрации влаги с использованием результатов интерполяции экспериментальных данных о водоудерживающей способности почвы (на примере глинистой почвы).

Ключевые слова: дифференциальная влагоемкость почвы, водоудерживающая способность почвы, гидравлическая проводимость почвы, капиллярность, логнормальное распределение эффективных радиусов почвенных пор, физическая интерпретация, интерполяция.

ВВЕДЕНИЕ

Уравнение неразрывности потока влаги в почве, часто именуемое уравнением Ричардса (1931), широко используется в инженерно-мелиоративных расчетах, а также для прогнозных вычислений влагообеспеченности урожаев сельскохозяйственных культур (Арефьев и др., 2012; Терлеев и др., 2012а). В частности, оно применяется для расчета динамики почвенной влаги в системе имитационного моделирования AGROTOOL (Poluektov et al., 2002; Баденко и др., 2011; Badenko et al., 2014). В данном уравнении зависимой (искомой) переменной является капиллярное давление (капиллярно-сорбционный потенциал) влаги, а независимыми переменными – время и пространственные координаты (глубина расчетного слоя почвы). Уравнение Ричардса, используемое для описания изотермического переноса

са почвенной влаги под действием капиллярно-сорбционных сил и гравитации вдоль оси, направленной вертикально вниз, с началом отсчета на поверхности почвы, имеет вид:

$$\mu \partial \psi / \partial t = \partial (k (\partial \psi / \partial x - 1)) / \partial x - f_x, \quad (1)$$

где t [сут.] – время; x [см] – пространственная координата (глубина расчетного слоя); ψ [см вод. ст.] – капиллярное давление влаги; μ [см вод. ст.⁻¹] – коэффициент дифференциальной влагоемкости почвы; k [см·сут.⁻¹] – коэффициент гидравлической проводимости почвы; f_x [сут.⁻¹] – функция стока, описывающая поглощение воды корнями растений.

Как известно, уравнение (1) относится к классу дифференциальных уравнений в частных производных параболического типа. При постоянных коэффициентах оно имеет аналитическое решение. В случае переменных коэффициентов применяются известные

и хорошо апробированные рутинные вычислительные процедуры для получения численного решения данного уравнения (Полуэктов и др., 2003). По существу, при переменных коэффициентах поиск решения уравнения Ричардса сводится к их функциональному представлению с последующей параметрической идентификацией функций $\mu = \mu(\psi)$ и $k = k(\psi)$. В настоящее время по причине отсутствия исчерпывающего теоретического обоснования указанных функций в рамках физических представлений о взаимодействии воды с твердой фазой почвы для описания коэффициентов уравнения (1) обычно используются эмпирические зависимости, которые с той или иной точностью интерполируют экспериментальные данные. В этой связи следует отметить две проблемы применения аппроксимаций почвенно-гидрофизических функций. Как известно, одним из важнейших гидрофизических свойств почвы является ее водоудерживающая способность, которую принято описывать в форме зависимости объемной влажности почвы θ [см³·см⁻³] от капиллярного давления влаги ψ [см вод. ст.]. Здесь уместно напомнить, что указанная зависимость называется основной гидрофизической характеристикой (ОГХ) почвы (Глобус, 1969). По определению функция $\theta(\psi)$ является первообразной функции $\mu(\psi)$. Поэтому для расчета коэффициента дифференциальной влагоемкости почвы широко практикуется подбор аппроксимирующей функции, которая используется для интерполяции измеренной ОГХ; затем данную функцию дифференцируют. Такую практику нельзя назвать методологически безупречной, поскольку дифференцирование аппроксимаций является, как известно, неустойчивой операцией, которая

может приводить к физически абсурдным результатам. В качестве негативного примера можно привести степенную функцию, ранее широко применявшуюся при интерполяции измененной ОГХ для последующего расчета μ . Таким образом, первая проблема применения аппроксимаций почвенно-гидрофизических функций состоит в том, что использование даже достаточно точно измеренной ОГХ не является гарантией получения адекватной функции дифференциальной влагоемкости почвы при дифференцировании произвольных аппроксимаций зависимости $\theta(\psi)$ (Полуэктов, Терлеев, 2002). Вторая проблема заключается в малой доступности экспериментальных данных относительно $\theta(\psi)$ и $k(\psi)$ по причине высокой трудоемкости прямых измерений указанных зависимостей.

Одним из достаточно успешных примеров частичного решения отмеченных проблем является метод Муалема-Ван Генухтена (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980). Он позволяет отказаться от прямых измерений зависимости $k(\psi)$ и опирается только на данные об ОГХ и коэффициенте фильтрации почвенной влаги k_s . Метод заключается в следующем: для расчета отношения $k(\psi)/k_s$ по формуле Муалема используется предложенная Ван Генухтеном аппроксимация ОГХ, позволяющая представить отношение $k(\psi)/k_s$ в виде функции с параметрами, которые являются общими и для данной аппроксимации ОГХ, и для отношения $k(\psi)/k_s$. В методе Муалема-Ван Генухтена аппроксимация ОГХ, а также вычисленное с ее помощью отношение функции гидравлической проводимости почвы к коэффициенту фильтрации влаги имеют следующий вид:

$$\theta(\psi) = \begin{cases} \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / (1 + (-\alpha\psi)^n)^m, & \psi < 0; \\ \theta_s, & \psi \geq 0, \end{cases} \quad (2a)$$

$$\frac{k(\psi)}{k_s} = \begin{cases} (1 + (-\alpha\psi)^n)^{-m/2} \left(1 - \left(1 - (1 + (-\alpha\psi)^n)^{-1} \right)^m \right)^2, & \psi < 0; \\ 1, & \psi \geq 0, \end{cases} \quad (2b)$$

где θ_s [см³·см⁻³] - объемная влажность полного насыщения почвенной толщи водой; θ_r [см³·см⁻³] - минимальный удельный объем жидкой воды в почве; α [см вод. ст.⁻¹] и n - эмпирические параметры; $m = 1 - 1/n$.

Производная данной аппроксимации влаги описывается следующим соотношением: ОГХ по величине капиллярного давления ем:

$$\frac{d\theta}{d\psi} = \begin{cases} (\theta_s - \theta_r) m n \alpha^n (-\psi)^{n-1} (1 + (-\alpha\psi)^n)^{-(m+1)}, & \psi < 0; \\ 0, & \psi \geq 0. \end{cases} \quad (3)$$

Практическое значение данного метода очевидно: он позволяет отказаться от трудоемких измерений зависимости $k(\psi)$. Наряду с этим, аппроксимация ОГХ (2a) достаточно точно интерполирует экспериментальные данные, а ее производная, вычисленная по формуле (3), описывается куполообразной кривой, которая характерна (исходя из физических представлений) для функции дифференциальной влагоемкости почвы $\mu(\psi)$. Показателем большого прикладного значения метода Муалема-Ван Генухтена является высокий индекс цитирования публикаций о нем и результатах его применения.

Основным недостатком данного метода является то, что параметры функций, описываемых соотношениями (2a), (2b) и (3), не имеют физического обоснования. В связи с этим не представляется возможным оценить указанные параметры по более доступным данным о физических свойствах почвы и, следовательно, это не позволит отказаться от проведения трудоемких прямых измерений ОГХ. Вместе с тем, поскольку зависимость (2a) не является физически интерпретированной функцией водоудерживающей способности почвы, а представляет собой абстрактную аппроксимацию ОГХ, предположение адекватности математической модели (3) по отношению к физическому свойству почвы, именуемому дифференциальной влагоемкостью почвы, остается более чем проблематичным. Кроме того, поскольку в основу метода Муалема-Ван Генухтена положена интерполяция экспериментальных данных, необходимо учитывать, что предсказание значений $k(\psi)/k_s$ по формуле (2b) принципиально ограничено тем диапазоном значений ψ , для которого были вычислены эмпирические параметры α и n аппроксимации ОГХ (2a).

Таким образом, метод Муалема-Ван Генухтена, с одной стороны, является, безусловно, весьма прогрессивным шагом в

направлении поиска решения указанных выше проблем, но, с другой стороны, с его помощью данные проблемы пока не решены полностью. В работе (Терлеев и др., 2014) предложено усовершенствование метода Муалема-Ван Генухтена. В настоящем исследовании авторы поставили цель на примере глинистой почвы проанализировать преимущества усовершенствованного метода расчета отношения функции гидравлической проводимости почвы к коэффициенту фильтрации влаги.

МЕТОД

В уравнении (1) функция водоудерживающей способности почвы в явном виде не присутствует. Учитывая данное обстоятельство, а также указанные выше проблемы использования аппроксимации ОГХ для расчета коэффициентов уравнения (1), возникает резонный вопрос о целесообразности использования аппроксимации ОГХ в поисках решения уравнения Ричардса. Ответить на поставленный вопрос можно следующим образом. Аппроксимация ОГХ необходима для того, чтобы с использованием значений капиллярного давления влаги, полученных в качестве решения уравнения Ричардса, иметь возможность вычислить, например, значения объемной влажности почвы, запасы продуктивной влаги в почве, нормы поливов, объемы стока влаги за пределы расчетной толщи почвы и т. д. Вместе с тем, для расчета коэффициентов уравнения Ричардса методологически более целесообразно использовать не аппроксимацию ОГХ, а физически обоснованную модель дифференциальной влагоемкости почвы. С помощью данной модели и формулы Муалема может быть вычислено отношение $k(\psi)/k_s$. Иначе говоря, ОГХ явно не используется в уравнении Ричардса, но является незаменимой функцией в преобразованиях результатов решения данного уравнения к виду, приемлемому для их дальнейшего практического использования. Сле-

дует отметить, что для данного случая ОГХ можно достаточно легко рассчитать интегрированием функции $\mu(\psi)$.

Таким образом, здесь предлагается в методологическом отношении более предпочтительный подход к моделированию гидрофизических свойств почвы. Он включает в себя следующие пять шагов: 1) физическое обоснование дифференциальной влагоемкости почвы и ее формулирование в виде функции капиллярного давления влаги; 2) применение формулы Муалема для описания отношения функции гидравлической проводимости почвы к коэффициенту фильтрации влаги; 3) интегрирование функции дифференциальной влагоемкости почвы для получения функции водоудерживающей способности почвы; 4) аппроксимация полученных почвенно-гидрофизических функций; 5) разработка физически адекватного приема параметрической идентификации полученных почвенно-гидрофизических функций и их аппроксимаций.

Первые три из пяти указанных выше шагов ранее пройдены Косуги (Kosugi,

$$\mu(\psi) = \begin{cases} -(\theta_s - \theta_r)(n/4)/(\psi - \psi_{ae}) \exp\left(-\pi(n/4)^2 \ln^2(-\alpha(\psi - \psi_{ae}))\right), & \psi < \psi_{ae}; \\ 0, & \psi \geq \psi_{ae}. \end{cases} \quad (4)$$

В формуле (4) все параметры имеют физическую (физико-статистическую) интерпретацию (Терлеев и др., 2012б, 2014). Параметр θ_r равен объемной влажности почвы при максимальном запасае в ней гигроскопической влаги. Параметр θ_s равен объемной влажности насыщения почвы при максимальном заполнении водой всего ее порового пространства. Параметр ψ_{ae} имеет смысл давления барботирования на изотерме иссушения изначально влагонасыщенной почвы. Параметр $n = 4/(\sigma\sqrt{2\pi})$ обратно пропорционален стандартному отклонению σ нормально распределенной случайной величины $\ln \bar{r}$, где $\bar{r} = (r - r_{\min})/(r_{\max} - r)$ - эффективный радиус почвенной поры; r - радиус капиллярной поры; r_{\max} и r_{\min} - соответственно максимальное и минимальное значения величины r . Для случая $r_{\min} \ll r$ ($r_{\min}=0$) справедливо соотношение $\psi - \psi_{ae} = -\beta/(r_{\max} \bar{r})$, из которого следует, что капиллярное давление влаги ψ_0 , заполняющей почвенные поры,

1994). Однако полученные им формулы оказались более громоздкими по сравнению с формулами Ван Генухтена. Кроме того, из-за отсутствия эффективного метода оценки параметров верификация модели, предложенной Косуги, показала худший результат по сравнению с результатом, который получил Ван Генухтен для глинистой почвы *Beit-Netofaclay* (Kosugi, 1996). По мнению авторов настоящей статьи, это является причиной того, что формулы Косуги в отношении практического использования существенно уступают формулам Ван Генухтена.

Тем не менее результаты, полученные Косуги при моделировании гидрофизических свойств почвы, безусловно, являются весьма важными. С опорой на идеи Косуги об эффективных радиусах почвенных пор, распределенных по логнормальному закону, и на представления о капиллярных явлениях в поровом пространстве почвы авторами настоящей статьи была получена формула для функции дифференциальной влагоемкости почвы:

начиная от мельчайших и заканчивая порами радиуса r_0 , которому соответствует наиболее вероятное значение $\ln \bar{r}_0$ случайной величины $\ln \bar{r}$, принимает значение $\psi_0 = \psi_{ae} - \beta/(r_{\max} \bar{r}_0)$. Параметр α описывается формулой $\alpha = -1/(\psi_0 - \psi_{ae}) = r_{\max} \bar{r}_0/\beta$, где $\bar{r}_0 = r_0/(r_{\max} - r_0)$. Параметр β представляет собой коэффициент пропорциональности в законе Лапласа $\psi = -\beta/r$, он равен $\beta = 2\gamma \cos \varphi/(g\rho_w)$, где γ - коэффициент поверхностного натяжения почвенной влаги на границе с воздухом; φ - краевой угол смачивания водой поверхности частиц почвы; g - ускорение свободного падения; ρ_w - плотность воды.

Соотношение (4) в общем виде описывает функцию дифференциальной влагоемкости почвы. Результатом интегрирования функции $\mu(\psi)$, а также подстановки данной функции в формулу Муалема и сопутствующую

щих вычислений является следующая система почвенно-гидрофизических функций:

$$\left\{ \begin{aligned} \theta(\psi) &= \begin{cases} \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(1/2)\operatorname{erfc}\left((n\sqrt{\pi}/4)\ln(-\alpha(\psi - \psi_{ae}))\right), & \psi < \psi_{ae}; \\ \theta_s, & \psi \geq \psi_{ae}, \end{cases} & (5a) \\ \frac{k(\psi)}{k_s} &= \begin{cases} \left(\frac{1}{4\sqrt{2}}\right)\sqrt{\operatorname{erfc}\left((n\sqrt{\pi}/4)\ln(-\alpha(\psi - \psi_{ae}))\right)}\left(\operatorname{erfc}\left((n\sqrt{\pi}/4)\ln(-\alpha(\psi - \psi_{ae}))\right) + 2/(n\sqrt{\pi})\right)^2, & \psi < \psi_{ae}; \\ 1, & \psi \geq \psi_{ae}. \end{cases} & (5b) \end{aligned} \right.$$

Для частного случая $r_{\max} \gg r$ можно принять $\psi_{ae} = 0$, тогда формулы (4), (5a) и (5b) принимают вид соотношений, которые были получены Косути (Kosugi, 1994).

Отмеченные в литературе (Шейн, 2005) связь параметра α с давлением барботирования, а также связь параметра n с дифференциальной влагоемкостью почвы в представленной здесь модели описываются соотношениями $\alpha = -1/(\psi_0 - \psi_{ae})$ и $n = 4\mu_0/(\alpha(\theta_s - \theta_r))$, где μ_0 - значение функции дифференциальной влагоемкости почвы, вычисленное по формуле (4) при $\psi = \psi_0$. Из анализа формулы (4) следует, что функция $\mu(\psi)$ достигает своего максимума в т.н. точке

перегиба кривой ОГХ при $\psi_{in} = \psi_{ae} + (\psi_0 - \psi_{ae})\exp(-8/(\pi n^2))$; в данной точке объемная влажность почвы имеет значение

$\theta_{in} = \theta(\psi_{in}) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)/(1 + \exp(-8/(\pi n)))$, которое соответствует максимальной капиллярно-сорбционной влагоемкости почвы (Воронин, 1986; Terleev et al., 2010).

С использованием аппроксимации Виницкого (Winitzki, 2008) почвенно-гидрофизические функции, описываемые соотношениями (5a) и (5b), преобразованы к более простому виду (Терлеев и др., 2012б, 2014):

$$\left\{ \begin{aligned} \theta(\psi) &= \begin{cases} \theta_r + (\theta_s - \theta_r)/(1 + (-\alpha(\psi - \psi_{ae}))^n), & \psi < \psi_{ae}; \\ \theta_s, & \psi \geq \psi_{ae}, \end{cases} & (6a) \\ \frac{k(\psi)}{k_s} &= \begin{cases} 1/\sqrt{1 + (-\alpha(\psi - \psi_{ae}))^n} / (1 + \exp(8/(n\pi))(-\alpha(\psi - \psi_{ae}))^n)^2, & \psi < \psi_{ae}; \\ 1, & \psi \geq \psi_{ae}. \end{cases} & (6b) \end{aligned} \right.$$

Таким образом, четвертый шаг предложенного выше подхода к моделированию гидрофизических свойств почвы состоит в использовании соотношений (6a) и (6b) для аппроксимации зависимостей $\theta(\psi)$ и $k(\psi)/k_s$, теоретически обоснованных в рамках физических представлений и соответственно описываемых формулами (5a) и (5b), в классе элементарных функций. Следует обратить внимание, что в частном случае при $\psi_{ae} = 0$ аппроксимация ОГХ (6a) принимает вид соотношения, ранее полученного предшественниками, например, Хаверкампом с соавторами (Haverkamp et al., 1977).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Здесь представлены результаты верификации разработанной авторами модели в виде системы физически адекватных функций водоудерживающей способности и гидравлической проводимости почвы с общими параметрами (табл. 1), а также приведены итоги сравнения усовершенствованного метода Муалема-Ван Генухтена с его оригинальной версией (табл. 2). Использованы экспериментальные данные из статьи Ван Генухтена (Van Genuchten, 1980) для глинистой почвы *BeitNetofaclay*, применительно к которой метод Муалема-Ван Генухтена показал относительно невы-

сокую точность предсказания отношения $k(\psi)/k_s$.

Таблица 1. Гидрофизические параметры почвы *BeitNetofaclay*

Параметр	Физическая размерность	Метод Муалема-Ван Генухтена	Усовершенствованный метод
θ_r	$[\text{см}^3 \cdot \text{см}^{-3}]$	0	0,24
θ_s	$[\text{см}^3 \cdot \text{см}^{-3}]$	0,446	0,462
α	$[\text{см вод. ст.}^{-1}]$	$152 \cdot 10^{-5}$	$462 \cdot 10^{-6}$
n	б/р	1,17	0,83
ψ_{ae}	$[\text{см вод. ст.}]$	—	0

Таблица 2. Сравнение расчетных значений почвенно-гидрофизических функций с опытными данными для почвы *BeitNetofaclay*

Сравниваемые методы	Корень квадратный из средней суммы квадратов отклонений расчетных значений от опытных данных			
	формула	$\theta(\psi)$	формула	$k(\psi)/k_s$
Метод Муалема-Ван Генухтена	(2a)	0,00883	(2b)	0,2648
Усовершенствованный метод	(5a)	0,01114	(5b)	0,04085
	(6a)	0,01178	(6b)	0,05509

Визуализация сравнения усовершенствованного метода с его оригинальной версией на примере глинистой почвы *BeitNetofaclay* осуществлена на рисунке. Здесь результаты интерполяции измеренной $\theta(\psi)$ изображены, во-первых, пунктирной кривой 1, построенной с использованием формулы (2a), и, во-вторых, сплошной кривой 3,

построенной с использованием формулы (5a); результаты предсказания отношения $k(\psi)/k_s$ изображены, во-первых, пунктирной кривой 2, построенной с использованием формулы (2b), и, во-вторых, сплошной кривой 4, построенной с использованием формулы (5b); соответствующие экспериментальные данные изображены окружностями.

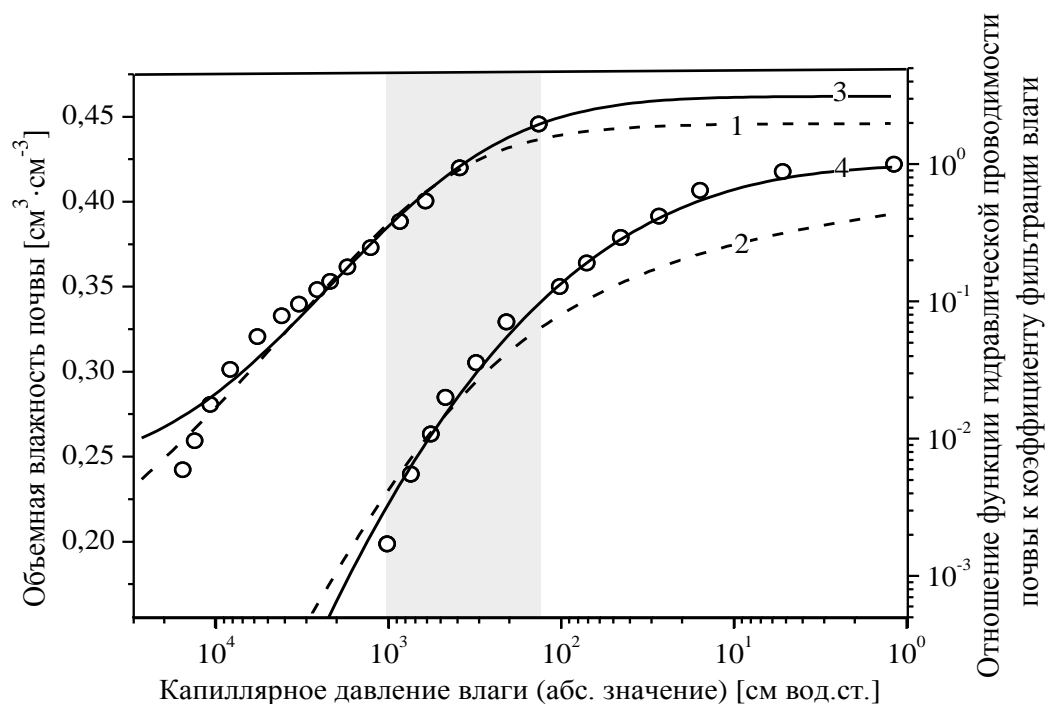


Рис. Функция водоудерживающей способности почвы и отношение функции гидравлической проводимости почвы к коэффициенту фильтрации влаги

На рисунке видно, что оба сравниваемых метода имеют сопоставимую и достаточно высокую точность интерполяции измеренной ОГХ (кривые 1 и 3), однако совпадение значений $k(\psi)/k_s$ с опытными данными заметно больше в случае использования усовершенствованного метода (кривая 4) по сравнению с его оригинальной версией (кривая 2).

Авторы настоящей статьи использовали следующий прием оценки общих параметров системы почвенно-гидрофизических функций. Данные измеренной ОГХ глинистой почвы *Beit Netofa clay* были интерполированы функцией (5a) с применением алгоритма Левенберга – Марквардта (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963). В расчетах по данному алгоритму использовался набор фиксированных значений параметра θ_r . Указанный параметр поочередно принимал значения от нуля до минимального измеренного значения объемной влажности почвы. Для каждого заданного значения θ_r интерполяцией измеренной ОГХ была вычислена соответствующая комбинация параметров n , α и θ_s (при условии $\psi_{ae} = 0$). Отбор искомой комбинации параметров осуществлялся по предлагаемым здесь критериям: 1) сумма квадратов отклонений вычисленных значений объемной влажности почвы от измеренных данных должна быть статистически неразличима с минимальной суммой, полученной в серии расчетов; 2) параметр θ_s не должен превосходить максимального значения измеренной объемной влажности почвы; 3) параметр $\alpha = -1/\psi_0$ должен соответствовать физически адекватному значению капиллярного давления влаги при максимальной капиллярно-сорбционной влагоемкости почвы, заключенному в интервале: $-2500 \leq \psi_0 \leq -250$ [см вод. ст.] (Мичурин, 1967). Таким образом, пятый шаг предложенного выше подхода к моделированию гидрофизических свойств почвы состоит в использовании данного приема оценивания общих параметров системы почвенно-гидрофизических функций, описываемых формулами (5a), (5b), (6a) и (6b).

Относительно невысокая точность совпадения кривой 2 на рисунке, описывающей отношение $k(\psi)/k_s$, которое вычислено ори-

гинальным методом Муалема-Ван Генухтена, с измеренными данными объясняется, по крайней мере, двумя причинами. Первая причина заключается в том, что диапазон значений ψ , для которого были определены параметры аппроксимации ОГХ (2a), лишь частично пересекается с диапазоном значений ψ , для которого было предсказано отношение $k(\psi)/k_s$, описываемое формулой (2b). На рисунке область пересечения указанных диапазонов выделена более темным фоном: в ней значения $k(\psi)/k_s$ совпадают с измеренными данными вполне удовлетворительно. Однако за пределами данной области точность результатов расчета $k(\psi)/k_s$ существенно снижается. Разумеется, формальные параметры аппроксимации ОГХ (2a), идентифицированные методом интерполяции измеренной ОГХ в определенном диапазоне значений ψ , не позволяют получить физически адекватные значения $k(\psi)/k_s$ в другом диапазоне значений ψ (при экстраполяции). Вторая причина состоит в том, что при оценивании параметра θ_r не было принято во внимание, что почва *Beit-Netofaclay* относится к разновидности почв тяжелого гранулометрического состава. Значение $\theta_r = 0$ для глинистой почвы является весьма сомнительным, поскольку известно, что глины обладают достаточно высокой гигроскопичностью.

ВЫВОДЫ

На примере глинистой почвы выявлен ряд преимуществ усовершенствованного метода оценки отношения функции гидравлической проводимости почвы к коэффициенту фильтрации влаги по сравнению с оригинальным методом Муалема-Ван Генухтена. Они заключаются в использовании физически адекватных функций дифференциальной влагоемкости, водоудерживающей способности и гидравлической проводимости почвы. Данные почвенно-гидрофизические функции имеют общие параметры, которые могут быть оценены по относительно доступным показателям физических свойств почвы. Кроме того, если указанные параметры оценены интерполяцией ОГХ, которая измерена в определенном диапазоне значений ψ , вкупе с приемом отбора (по предложенным критериям) искомой комбинации

параметров с учетом физического смысла последних, то использование полученных таким образом параметров позволяет обобщенно экстраполировать результаты предсказания отношения $k(\psi)/k_s$ на более широкий диапазон значений капиллярного давления влаги, что подтверждено верификацией усовершенствованного метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арефьев Н. В., Баденко В. Л., Терлеев В. В., Латышев Н. К., Крылова И. Ю., Гляденкова Н. А. 2011. Определение водно-физических свойств почв при мелиоративных изысканиях. Мелиорация и водное хозяйство. 2:18-21.
- Баденко В. Л., Баденко Г. В., Терлеев В. В., Латышев Н. К. 2011. ГИС-технологии в информационном обеспечении системы имитационного моделирования AGROTOOL. Агрофизика. 3:1-5.
- Воронин А. Д. 1986. Основы физики почв. М.: МГУ. 244 с.
- Глобус А. М. 1969. Экспериментальная гидрофизика почв. Л.: Гидрометеиздат. 356 с.
- Мичурин Б. Н. 1967. Зависимость свойств почвенной влаги и ее доступности для растений от агрегатного состояния почвы. Автореф. дисс. док. с.-х. наук. М.: Почвенный институт. 34 с.
- Полужков Р. А., Терлеев В. В. 2002. Моделирование водоудерживающей способности и дифференциальной влагоемкости почвы. Метеорология и гидрология. 11:93-100.
- Полужков Р. А., Опарина И. В., Терлеев В. В. 2003. Три способа расчета динамики почвенной влаги. Метеорология и гидрология. 11:90-98.
- Терлеев В. В., Полужков Р. А., Бакаленко Б. И. 2012а. Структура информационного обеспечения модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. Агрофизика. 2:29-36.
- Терлеев В. В., Mirschel W., Баденко В. Л., Гусева И. Ю., Гуринов П. Д. 2012б. Физико-статистическая интерпретация параметров функции водоудерживающей способности почвы. Агрофизика. 4:1-8.
- Терлеев В. В., Нарбут М. А., Топаж А. Г., Миршель В. 2014. Моделирование гидрофизических свойств почвы как капиллярно-пористого тела и усовершенствование метода Муалема-Ван Генухтена: теория. Агрофизика. 2(14):35-44.
- Шеин Е. В. 2005. Курс физики почв: Учебник. М.: МГУ. 432 с.
- Badenko V., Terleev V., Topaj A. 2014. AGROTOOL software as an intellectual core of decision support systems in computer aided agriculture. Applied Mechanics and Materials. 635-637:1688-1691.
- Haverkamp R., Vauclin M., Touma J., Wierenga P. J., Vachaud G. 1977. A comparison of numerical simulation model for one-dimensional infiltration. Soil Sci. Soc. Am. J. 41:285-294.
- Kosugi K. 1994. Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention. Water Resour. Res. 30:891-901.
- Kosugi K. 1996. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. Water Resour. Res. 32:2697-2703.
- Levenberg K. 1944. A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares. Quarterly of Applied Mathematics. 2:164-168.
- Marquardt D. W. 1963. An algorithm for least-square estimation on non-linear parameters. J. Soc. Ind. Appl. Math. 11:431-441.
- Mualem Y. 1976. A new model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res. 12:513-522.
- Poluektov R. A., Fintushal S. M., Oparina I. V., Shatskikh D. V., Terleev V. V., Zakharova E. T. 2002. AGROTOOL - a system for crop simulation. Archives of Agronomy and Soil Science = Archiv fuer Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde. 48(6):609-635.
- Richards L. A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous media. Physics. 1:95-112.
- Terleev V. V., Mirschel W., Schindler U., Wenkel K.-O. 2010. Estimation of soil water retention curve using some agrophysical characteristics and Voronin's empirical dependence. Journal International Agrophysics. 24(4):381-387.
- Van Genuchten M. Th. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44:892-899.
- Winitzki S. 2008. A handy approximation for the error function and its inverse (in <https://sites.google.com/site/winitzki/sergei-winitzkis-files/erf-approx.pdf?attredirects=0>).