СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ. АГРОНОМИЯ

DOI: 10.32786/2071-9485-2020-03-15

HYDROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF SOIL AND MOVEMENT OF MOISTURE IN THE AERATION ZONE

A. N. Salugin¹, T. A. Ryzhova²

¹*Federal Scientific Center for Agroecology, Complex Reclamation and Protective Afforestation
of the Russian Academy of Sciences, Russia*

²*Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
«Volgograd State Agrarian University»*

Received 10.05.2020

Submitted 14.08.2020

*Research conducted in the framework of the state task № 0713-2019-0003 "to Develop
the theoretical basis of the water balance of Agroecological and models of forest management
in river basins, forest steppe and steppe zones of the European part of the Russian Federation"
(№ state registration AAAA-A16-116122010036-5) financing of Ministry of science and higher
education of the Russian Federation on the State task № 0713-2016-0506*

Abstract

Introduction. The moisture conductivity of soils with different granulometric composition in the mode of unsaturated moisture content has been studied. By restoring the main hydrophysical characteristic - water-holding capacity, the intensity of moisture transfer in the upper soil horizon is investigated. The moisture conductivity was determined by the change in humidity. The recovery method for land reclamation tasks frees the researcher from laborious laboratory research. **Materials and methods.** Obtaining the main hydrophysical characteristics using the physical characteristics of the soil (particle size distribution) was carried out on semi-empirical mathematical models. **Results and conclusion.** The adequacy of mathematical modeling of the movement of moisture in the upper layer of the aeration zone, taking into account the porosity with a different ratio of silt and sand fractions, is shown. Hydrophysical characteristics: water-holding capacity (the main hydrophysical characteristic) and the dependence of moisture conductivity on moisture are considered as a result of the structure of soils, reflected in the granulometric composition. The relative content of clay, sand and silt determines the intra-soil pressure, which is the main factor in the retention and movement of moisture. Experimental data of soil samples with different granulometric composition were processed for mathematical modeling of the vertical movement of water in the upper layer of the aeration zone. The calculations were performed using a modified Darcy equation, including the dependence of moisture conductivity on moisture content. The data obtained adequately reflect the dynamics of moisture transfer for different types of soils. The method of restoring the main hydrophysical characteristics and determining the dependence of moisture conductivity on the particle size distribution can be fruitfully used in calculating the optimal water supply for plants, the dynamics of the water balance, and the maximum efficiency of using irrigation systems.

Key words: *basic hydrophysical characteristic, granulometric composition, moisture conductivity, vertical moisture transfer.*

Citation. Salugin A. N., Ryzhova T. A. Hydrophysical characteristics of soil and moisture movement in the aeration zone. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2020. 3(59). 152-162 (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2020-03-15.

Author's contribution. All the authors of this study were directly involved in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this article have read and approved the final version presented.

Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

УДК 631.432.3

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЧВЫ И ПЕРЕДВИЖЕНИЯ ВЛАГИ В ЗОНЕ АЭРАЦИИ

А. Н. Салугин¹, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник
Т. А. Рыжова², аспирант

¹ФНЦ агроэкологии РАН, г. Волгоград

²Волгоградский государственный аграрный университет, г. Волгоград

Дата поступления в редакцию 10.05. 2020

Дата принятия к печати 14.08.2020

**Исследования проведены в рамках выполнения государственного задания № 0713–2019–0003
«Разработать теоретические основы водного баланса Агролесоландшафтов и модели
лесоаграрного Природопользования в речных бассейнах лесостепной и степной зон
европейской части РФ» (№ госрегистрации АААА–А16–116122010036–5) финансирование
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации
по Государственному заданию № 0713–2016–0506.**

Актуальность. Изучена влагопроводность почв с различным гранулометрическим составом (ГС) в режиме ненасыщенного содержания влаги. С помощью восстановления основной гидрофизической характеристики (ОГХ) – водоудерживающей способности исследуется интенсивность переноса влаги в верхнем почвенном горизонте. **Материалы и методы.** Влагопроводность определялась по изменению влажности. Метод восстановления для задач мелиорации освобождает исследователя от трудоемких лабораторных исследований. Получение ОГХ с применением физических характеристик почвы (гранулометрический состав) осуществлялось на полуэмпирических математических моделях. **Результаты и выводы.** Показана адекватность математического моделирования передвижения влаги в верхнем слое зоны аэрации с учетом пористости с различным соотношением илистой и песчаной фракций. Гидрофизические характеристики: влагоудерживающая способность (ОГХ) и зависимость влагопроводности от влажности – рассмотрены как результат строения почв, отраженного в гранулометрическом составе. Относительное содержание глины, песка и ила определяет внутрипочвенное давление, которое является основным фактором удержания и перемещения влаги. Обработаны экспериментальные данные почвенных образцов с различным гранулометрическим составом для математического моделирования вертикального движения воды в верхнем слое зоны аэрации. Расчеты выполнены с использованием модифицированного уравнения Дарси, включающего зависимость влагопроводности от содержания влаги. Полученные данные адекватно отражают динамику влагопереноса для различных типов почв. Метод восстановления ОГХ и определение зависимости влагопроводности от гранулометрического состава может быть плодотворно использован в расчетах оптимального водообеспечения растений, динамике водного баланса, максимальной эффективности использования оросительных систем.

Ключевые слова: гидрофизические характеристики почвы, гранулометрический состав почвы, влагопроводность почвы, вертикальный перенос влаги.

Цитирование. Салугин А. Н., Рыжова Т. А. Гидрофизические характеристики почвы и передвижения влаги в зоне аэрации. *Известия НВ АУК.* 2020. 3(59). 152-162 DOI: 10.32786/2071-9485-2020-03-15.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении или анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. Изучать процесс вертикального передвижения влаги в почве можно различными методами: в лаборатории; в полевых условиях; теоретически; методом математического моделирования. Перемещение влаги в почве определяется ее физическими и гидрофизическими свойствами: гранулометрическим составом, влагопроводностью, водоудерживающей способностью (зависимостью матричного давления почвенной влаги от ее содержания). Для определения скорости передвижения влаги в

верхних слоях почвы создают пространственно-временную математическую модель, параметрами которой являются гранулометрический состав и данные по восстановлению основной гидрофизической характеристики (ОГХ) [2, 3, 5, 7, 10].

Теоретические методы получения данных по водоудержанию почвы как альтернатива прямому измерению ненасыщенной влагопроводности, основаны на статистических моделях распределения пор по размерам, описывающими передвижение воды через почвенную толщу уравнением Дарси [3]. Большое количество моделей такого плана появилось в течение последних десятилетий [2, 3, 7-9, 11]. Эти модели требуют, как правило, данных по водоудержанию почвы или в табличной форме, или в виде аналитических зависимостей с параметрами, определяемыми эмпирически. Таким образом, было предложено большое количество аналитических выражений для удержания воды, но лишь немногие из них используют распределение пор по размерам – гранулометрический состав. Авторами [8-11] разработаны компьютерные алгоритмы для анализа содержания влаги в почве и влагопроводности в ненасыщенных почвах. С помощью восстановления гидрофизических характеристик почв на основе их физико-химических свойств: плотности, гранулометрического состава, пористости, полевой влагоемкости, гигроскопической влажности, коэффициента фильтрации – представляется возможным оценивать вертикальное движение воды. Гидрофизические характеристики являются ключевыми параметрами при количественном описании водного потока через приповерхностную зону.

Материалы и методы. Гранулометрический состав (ГС) определяет относительное содержание различных фракций почвенных частиц от песка до глины (от 10 мк до 1 мм). Гидрофизические параметры почв: основная гидрофизическая характеристика и влагопроводность – определяют водные режимы ирригации и динамику водного баланса в целом. Исследование ОГХ в лабораторных условиях связаны с измерениями влажности в широком диапазоне внутрипочвенного давления от 0 до 10^4 см водного столба.

В связи с этим весьма актуальной является задача восстановления ОГХ по данным гранулометрического состава, который отражает физическую характеристику неоднородности и количественное соотношение фракций различной дисперсности. Данная характеристика описывает способность почвы удерживать влагу. Процесс сохранения влаги при этом выражается в виде зависимости влажности почв от матричного давления. Настоящая работа является продолжением исследований [4-6] в этом направлении. Исследования посвящены анализу процесса перемещения влаги в ненасыщенных почвах с различным гранулометрическим составом, являющимся одним из основных факторов, определяющих водоудержание почвы и ее влагопроводность [1, 7, 10]. В работе изучались почвы с различным распределением частиц, приведенном в таблице 1.

Таблица 1–Гранулометрический состав почв для образцов верхнего слоя (0–0,2м)

Table 1 - Granulometric composition of soils for samples of the upper layer (0-0,2 m)

№ образца / №	Содержание частиц (% массы сухой почвы) разного диаметра, мм / Particle content (% of dry soil mass) of different diameters, mm	Гранулометрический состав почвы / Granulometric compo-
------------------	--	---

sample's	1-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	Менее 0,001 / Less than 0,001	Более 0,01 песок More than 0,01 sand	Менее 0,01 глина Less than 0,01 clay	sition of soil
СХП «Луч» п. Новый Рогачик / SHP "Luch" p. Novy Rogachik									
1	–	32,4	35,7	9,9	6,1	15,9	68,1	31,9	суглинок / loam
Полигон «Городище» / Polygon "The Settlement»									
2	4,5	24,2	34,0	5,2	5,6	23,8	65,4	34,6	глинистый суглинок / clay loam
3	1,2	13,8	36,2	5,9	9,6	30,4	54,1	45,9	глинистый суглинок / clay loam
4	9,3	13,1	16,5	1,6	20,5	38,9	38,9	61,1	глина / clay
Полигон «Качалино» / Kachalino Polygon»									
5	6,3	27,1	11,7	5,4	20,8	28,7	45,1	54,9	глинистый суглинок / clay loam
Лизиметр ФГБНУ ФНЦ / Lysimeter of FNC									
6	10,4	33,29	55,35	1,96	0,68	6,6	2,12	9,4	суглинистый песок / loamy sand
Образец "Мезанский" / Sample "Mezansky"									
7	1,1	0,47	5,13	4,92	2,5	85,5	0,05	0,38	Песок / sand
Образец ООО"БК" / Sample of ООО "БК"									
8	10,4	28,1	39,9	1,5	0,41	15,4	4,18	0,06	суглинистый песок / loamy sand
Образец ООО"БК" / Sample of ООО "БК"									
9	0,17	0,51	5,73	4,75	2,61	85,8	0,19	0,27	песок / sand
Образец "Казантипский" / Sample "Kazantipsky"									
10	0,37	0,04	17,73	0,72	0,08	80,9	0,05	0,06	песок / sand

Для восстановления ОГХ по методу [4, 5, 11] был осуществлен переход от классификации Качинского к Международной классификации ФАО (рисунок 1) для десяти типов почв. Для перехода были построены графики кумулятивной вероятности и плотности распределения почвенных частиц по размерам для почв: суглинок; глинистый суглинок; глина; песок; суглинистый песок (рисунок 2). В таблице 1 приведены данные для 10 образцов, определяющих переход от отечественной классификации почв (глина и песок) к международной (пыль, песок, глина). Переход произведен по треугольнику Ферре.

Исследования показали, что все образцы в классификации ФАО подразделяются на пять типов (рисунок 1).

Рисунок 1 – Треугольник Ферре с данными почв 5 образцов: 1 – суглинок, 2 – глинистый суглинок; 3 – глина; 4 – песок; 5 – суглинистый песок

Figure 1 – Ferre Triangle with soil data from 5 samples: 1 – Loam; 2 – Clay Loam; 3 – Clay; 4 – Sand; 5 – Loamy sand

Рисунок 2 – Кумулятивная вероятность (а) и плотность распределения почвенных частиц по размерам (б) 1 –суглинок; 2–глинистый суглинок; 3 – глина; 4 – песок; 5 – суглинистый песок

Figure 2 - Cumulative probability (a) and density of distribution of soil particles by size (b): 1–Loam; 2– Clay Loam; 3 – Clay; 4 – Sand; 5 –Loamy sand

Результаты и обсуждение. Получение данных о почвенном давлении и соответствующее ему содержание влаги в виде кривой удержания дорогостоящи и труднореализуемы даже в лабораторных условиях. Одна из альтернатив прямому измерению ненасыщенной влагопроводности – это использование теоретических методов математического моделирования, которые предсказывают водоудержание почвы по ее предикторам: влагопроводности, распределению частиц по размерам, плотности, пористости и пр. [2, 4, 6, 7, 9, 10]. Гидрофизические характеристики могут выступать в этом случае исходными данными для оценки гидравлических свойств ненасыщенных почв.

Для решения теоретических и прикладных задач бывает необходимо оценивать запасы воды в зоне аэрации и динамику при вертикальном передвижении к грунтовым водам. Изучению гидрофизики почв в зоне аэрации с ненасыщенной влагой в последние годы посвящено значительное число как экспериментальных, так и теоретических исследований [2, 5, 8-11]. Характер движения воды в области аэрации связан с неоднородностью почвы, с широким спектром распределения почвенных частиц по размерам (от 2000 до 0,1 мкм). Гранулометрический состав при этом выступает основным критерием для достаточно точного и удобного анализа ненасыщенных гидравлических свойств почвы.

Исследования авторов [5, 7, 8-11] определили множество альтернативных теоретических методов прямому измерению ненасыщенного влагоудержания (ОГХ). Все они основаны на физических свойствах почвы. Модель Ван Генухтена, например, связывает их с гидрологическими (1, 2) [7, 8-11].

$$K(S_e) = K_\phi \cdot S_e^\lambda \{1 - [1 - S_e^{1/m}]\}^2, S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (1)$$

где K_ϕ – влагопроводность при полном насыщении, мм/сут, S_e – эффективная влажность, отражающая количество влаги, участвующей в движении; θ – влажность $\text{см}^3/\text{см}^3$, θ_r , θ_s – остаточная и насыщенная влажности; λ – параметр распределения пор по размерам, влияющим на наклон функции удержания; m – параметр, отражающий распределение почвенных частиц по размерам.

$$\theta(h) = \theta_s + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m}, \quad m = 1 - \frac{1}{n}, \quad (2)$$

где $\theta(h)$ – влажность как функция от почвенного давления h (вод. ст.) θ_r , θ_s – остаточная влажность и влажность насыщения; α (1 / см) – коэффициент входа воздуха; n , m – эмпирические константы, влияющие на форму кривой удержания.

Таблица 2 – Параметры Ван Генухтена для образцов почв: 1 – суглинок; 2,3,5 – глинистый суглинок 4 – глина ; 6,7,9,10 – песок; 8 – суглинистый песок [9]

Table 2 –Van Genuchten parameters for soil samples: 1 – Loam; 2,3,5 – Clay Loam, 4 – Clay; 6,7,9,10 – Sand; 8 – Loamy sand [9]. $\text{см}^3/\text{см}^3$

№ образца почвы № soil sample	$\theta_r, \text{см}^3/\text{см}^3$	$\theta_s, \text{см}^3/\text{см}^3$	$\alpha, 1/\text{см}$	$n, (—)$	$K_0, \text{см}/\text{д}$
1 – Суглинок / Loam	0,078	0,43	0,036	1,56	24,96
2,3,5 – Глинистый суглинок / Clay loam	0,075	0,41	0,019	1,31	6,24
4 – Глина / Clay	0,068	0,38	0,008	1,09	4,80
6,7,9,10 – Песок / Sand	0,045	0,43	0,145	2,68	712,8
8 – Суглинистый песок / Sandy loam	0,065	0,41	0,075	1,89	106,1

Данные таблицы 2 были использованы в нашей работе в задачах восстановления ОГХ с помощью зависимости Ван Генухтена в программе RETC 6.2 [8-11] по формуле (2). Для получения кривых ОГХ использовались гидрофизические параметры, представленные в таблице 3. На рисунке 3 показаны результаты работы пакета RETC для пяти почв.

Рисунок 3 – Восстановленные кривые ОГХ для образцов 1-5:
1 – суглинок, 2 – глинистый суглинок; 3 – глина; 4 – песок; 5 – суглинистый песок

Figure 3 – Restored OGC curves for samples 1-5:
1 – Loam; 2 – Clay Loam; 3 – Clay; 4 – Sand; 5 – Loamy sand

На рисунке 3 приведены расчетные S-кривые удержания для пяти типов почв. Значительное различие между пятью плавными кривыми объясняется увеличением почвенного давления за счет илистой, тонкодисперсной фракции. Это указывает на увеличение водоудержания воды при «утяжелении» почвы (увеличение фракции пыли). Полуэмпирический подход к проблеме влагопроводности и удержанию воды в рамках парадигмы Ван Генухтена [8-11] в настоящее время эффективно используется российскими учеными для решения проблем гидрологии и мелиорации почв [4, 5, 7].

Процесс продвижения воды в почву можно описать скоростью ее проникновения и общим объемом, накопленным в течение определенного времени. Рассмотрим этот процесс более подробно. Предположим, что скорость поступления за первый час 2 см/час; за второй – 1 см/час. Таким образом, вода проникнет в почву на 3 см. Описать этот процесс математически можно дифференциальными уравнениями в частных производных. Движение потока воды в ненасыщенной зоне задается уравнением Дарси [3, 5, 7, 10]:

$$q = \frac{Q}{st} = K_{\phi} \frac{\Delta P}{\Delta z}, \quad (3)$$

где Q — количество воды прошедшей через площадку s за время t , Δz — глубина почвы, ΔP — изменение почвенного давления при изменении глубины на величину Δz .

При изменении давления воды K_{ϕ} измеряется как дополнительное количество к соответствующему уровню воды в единицу времени [10]. Так как гравитационный градиент $\Delta P/\Delta z$ близок к 1, имеем:

$$K_{\phi} = Q/st \quad (4)$$

Ненасыщенная влагопроводность, в отличие от коэффициента фильтрации, имеет различные значения и зависит от влажности почвы (внутрипочвенного давления) [3, 7]. В таблице 3 приведены данные коэффициент влагопроводности при насыщении для разных типов почв [7].

Таблица 3 – Коэффициент влагопроводности при насыщении

Table 3 – The coefficient of hydraulic conductivity at saturation

Почва / Soil	Диапазон K_{ϕ} (мм·сут ⁻¹) / The range of K_f (mm st ⁻¹)
Гравий / Gravel	$0,21 \cdot 10^{-3} - 0,18 \cdot 10^{-4}$
Грубый песок / Coarse sand	$0,16 \cdot 10^{-7} - 0,38 \cdot 10^{-6}$
Песок / Sand	$0,21 \cdot 10^{-6} - 0,13 \cdot 10^{-4}$
Средний песок / Medium sand	$0,64 \cdot 10^{-7} - 0,96 \cdot 10^{-6}$
Неоднородный гравий и песок / Non-uniform gravel and sand	$0,32 \cdot 10^{-8} - 0,96 \cdot 10^{-7}$
Грубый оторфованный песок / Rough sand torn off	$0,21 \cdot 10^{-7} - 0,25 \cdot 10^{-7}$
Тонкий оторфованный песок / Thin-peated sand	$0,96 \cdot 10^{-9} - 0,2 \cdot 10^{-8}$
Моренный гравий / Moraine gravel	$0,96 \cdot 10^{-10} - 0,45 \cdot 10^{-8}$
Моренный песок / Moraine sand	$0,96 \cdot 10^{-11} - 0,19 \cdot 10^{-8}$
Опесчанная легкая глина / Pescantina light clay	$0,96 \cdot 10^{-11} - 0,25 \cdot 10^{-10}$
Пылеватый моренный песок / Dusty moraine sand	$0,32 \cdot 10^{-11} - 0,19 \cdot 10^{-10}$
Опесчаненный тяжелый суглинок / Desalinated heavy loam	$0,32 \cdot 10^{-11} - 0,25 \cdot 10^{-10}$
Суглинок / Loam	$0,19 \cdot 10^{-12} - 0,19 \cdot 10^{-10}$
Тяжелая глина / Heavy clay	$0,16 \cdot 10^{-12} - 0,28 \cdot 10^{-12}$

Для ненасыщенных почв уравнение Дарси выглядит как:

$$q = -K(h) \frac{\Delta P}{\Delta Z}, \quad (5)$$

где q — скорость стока; $K(h)$ — коэффициент влагопроводности, $\frac{\Delta P}{\Delta Z}$ — градиент давления.

Зависимость Дарси для ненасыщенных почв применима тогда, когда изменение влажности во времени приводит к изменению потока воды q на разнице высот:

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta t} = - \frac{\Delta q}{\Delta z}. \quad (6)$$

Градиент гравитационного давления направлен вниз (при увеличении z давление уменьшается) поэтому знак «-». Подставив в (6) значение для q из (5) получим:

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta t} = - \frac{\Delta}{\Delta z} \left(K(h) \frac{\Delta h}{\Delta z} \right) \quad (7)$$

где θ — влажность, h — давление внутрипочвенной влаги, z — глубина.

Решая уравнение (7), можно определить вертикальное движение влаги в верхних слоях почвы. Перепишем (6), (7) в более удобном виде:

$$q = -K(h) \left(\frac{\Delta(P-z)}{\Delta z} \right) = K(h) \left(\frac{P_2 - P_1}{\Delta z} - 1 \right), \quad (8)$$

где $\Delta P / \Delta z$ — изменение давления на расстоянии Δz между двумя вертикально расположенными слоями, $K(h)$ — коэффициент влагопроводности при заданном давлении.

Таблица 4 – Данные для математического моделирования
вертикального переноса влаги

Table 4 – Data for mathematical modeling vertical moisture transfer

Класс по гранулометрическому составу / Granulometric composition class	Порозность (% объемный) / Porosity (%volume)	Плотность почвы (г/см ³) / Soil density (g / cm ³)	НВ (% к весу) / NV (% by weight)	ВРК (% к весу)* / VRK (% by weight)*	ВЗ (% к весу) / VZ (% by weight)	ДДВ (% к весу) / DV (% by weight)	Коэффициент фильтрации, (см/сут) / Filtration coefficient, (cm/day)
Песок / Sand	32–42	1,6	5–10	4,5	3–6	2–6	80 –200
Суглинистый песок / Loamy Sand	40–46	1,5	10–18	7,5	4–8	6–10	50–150
Суглинок / Loam	43–51	1,4	18–26	13,25	8–12	10–14	40–120
Глинистый суглинок / Glay loame	47–51	1,35	23–31	18,5	11–15	12–16	30–70
Глина / Glay	49–53	1,3	27–35	21,0	13–17	14–18	20–70
Песок / Sand	51–55	1,25	31–39	25,5	18–24	14–18	2–30

Таблица 5 – Результаты моделирования вертикального переноса влаги

Table 5 – Results of modeling of vertical moisture transport

Тип почвы / Soil type	НВ / NV	P1	Δz	K(нв)мм/сут / K(NV) mm/day	q мм/сут / q mm/day
Песок / Sand	0,060	248,000	20,000	0,260	2,964
Суглинистый песок / Loamy Sand	0,170	181,300	20,000	12,400	100,006
Суглинок / Loam	0,260	796,1	20,000	0,68	26,387
Глинистый суглинок / Glay loame	0,310	1513	20,000	0,137	10,227
Глина / Glay	0,350	2589	20,000	0,042	5,395

В верхнем профиле почвы 20 см при влажности НВ вода перетечет: в суглинистом песке (Loamy Sand) со скоростью 100 мм/сут; на втором месте суглинок (Loamy) – 26,387 мм/сут.; на третьем — глинистый суглинок (Glay loame) – 10,277 мм/сут; на четвертом – глина (Glay) – 5,4 мм/сут. В песке (Sand) переток влаги самый медленный – 3 мм/сут.

Выводы. Таким образом, из приведенных выше результатов можно сделать практические выводы. Зависимость влагопроводности от содержания влаги в почве, а также восстановленная с ее помощью основная гидрофизическая характеристика позволяют решать задачи, связанные с вертикальным движением влаги в ненасыщенных почвах. Если решать модифицированное уравнение Дарси в численной форме, используя малые временные шаги по вертикали (глубине) для каждого из элементарных почвенных слоев горизонта можно определять распределение влажности в верхнем профиле с учетом начальных и краевых условий: поступления осадков, расхода на полив и транспирацию растениями и т. д. Данные подобных исследований, несомненно, будут полезны при разработке оросительных систем, определения нужных мощностей по-

ливных конструкций, связанных с оптимальным расходом воды при поливе. Восстановление ОГХ и влагопроводности почв необходимы для эффективного использования оросительной воды и планирования водной мелиорации. Рассмотренная в статье концепция полуэмпирических приемов исследования гидрофизических свойств почв и математического моделирования представляет собой новый, на наш взгляд, подход к изучению физической природы гидрологических почвенных процессов.

Библиографический список

1. Агрофизика: монография / Е. В.Шейн, М. А. Мазиров, С. И. Зинченко, В. М. Гончаров, А. А.Корчагин, А. Б.Умаров, Е. Ю. Милановский. Иваново: Издательско-полиграфический комплекс «ПресСто», 2016. 124 с.
2. Мелихова Е. В. Математическое моделирование процессов влагопереноса при капельном и внутрипочвенном орошении // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2016. № 1 (41). С. 228-234.
3. Моделирование основной гидрофизической характеристики черноземов Алтайского края / А. Г. Болотов, С. Н. Дубский, А. Н. Шаталов, А. Н. Шаталов, И. Н. Бутырин, Е. Н. Кузнецов, И. А. Гончаров, Н. А. Гончаров // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2015. № 2. С. 31-35.
4. Салугин А. Н. Восстановление гидрофизических характеристик почв с помощью математического моделирования // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2017. № 66(2). С. 205-209.
5. Салугин А. Н. Применение основных гидрофизических характеристик для моделирования вертикального движения влаги в зоне аэрации // Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 2(49). С. 58-65.
6. Смагин А. В. К термодинамической теории водоудерживающей способности и дисперсности почв // Почвоведение. 2018. № 7. С. 836-851.
7. Шейн Е. В. Теоретические основы гидрологии почв в трудах А. А. Роде и современные подходы к описанию движения и равновесия влаги в почвах // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. 2016. № 83. С. 11-21.
8. A pH based pedotransfer function for scaling saturated hydraulic conductivity reduction: Improved estimation of hydraulic dynamics in HYDRUS / A. Ali, A. J. W. Biggs, J. Šimůnek, J. McL. Bennett // Vadose Zone Journal. 2020. V. 18(1). 190072. doi: 10.2136/vzj2019.07.0072
9. Modeling of horizontal water redistribution in an unsaturated soil / L. Zhuang, S. M. Hasanizadeh, M. Th. van Genuchten, A. Leijnse, A. Raoof, C. Qin // Vadose Zone J. 2016. V. 15(3). doi: 10.2136/vzj2015.08.0109
10. Šimůnek J., van Genuchten M. Th., Šejna M. The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media // Technical Manual. Prague: PC-Progress, 2018.
11. Šimůnek J., van Genuchten M. Th., Šejna M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages // Vadose Zone Journal. 2016. V. 15(8), P. 25. doi: 10.2136/vzj2016.04.0033

Conclusions. Thus, practical conclusions can be drawn from the above results. The dependence of the moisture conductivity on the moisture content in the soil, as well as the basic hydrophysical characteristics restored with its help, allow solving problems associated with the vertical movement of moisture in unsaturated soils. If we solve the modified Darcy equation in numerical form, using small time steps along the vertical (depth) for each of the elementary soil layers of the horizon, it is possible to determine the distribution of moisture in the upper profile, taking into account the initial and boundary conditions: precipitation flow, consumption for irrigation and transpiration by plants, etc. The data of such studies will undoubtedly be useful in the development of irrigation systems, in determining the required capacities of irrigation structures associated with the optimal water consumption during irrigation. The restoration of WGC and soil moisture conductivity are necessary for the effective use of irrigation water and planning of water rec-

lamation. The concept of semi-empirical methods for studying the hydrophysical properties of soils and mathematical modeling considered in the article is a new, in our opinion, approach to studying the physical nature of hydrological soil processes.

Reference

1. Agrofizika: monografiya / E. V. Shein, M. A. Mazirov, S. I. Zinchenko, V. M. Goncharov A. A. Korchagin, A. B. Umarov, E. Yu. Milanovskij. Ivanovo: Izdatel'sko-poligraficheskij kompleks "PresSto", 2016. 124 p.
2. Melihova E. V. Matematicheskoe modelirovanie processov vlagoperenosa pri kapel'nom i vnutripochvennom oroshenii // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. 2016. № 1 (41). P. 228-234.
3. Modelirovanie osnovnoj gidrofizicheskoy harakteristiki chernozemov Altajskogo kraya / A. G. Bolotov, S. N. Dubskij, A. N. Shatalov, A. N. Shatalov, I. N. Butyrin, E. N. Kuznecov, I. A. Goncharov, N. A. Goncharov // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2015. № 2. P. 31-35.
4. Salugin A. N. Vosstanovlenie gidrofizicheskikh harakteristik pochv s pomosh'yu matematicheskogo modelirovaniya // Puti povysheniya jeffektivnosti oroshaemogo zemledeliya. 2017. № 66(2). P. 205-209.
5. Salugin A. N. Primenenie osnovnykh gidrofizicheskikh harakteristik dlya modelirovaniya vertikal'nogo dvizheniya vlagi v zone aŕracii // Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. 2018. № 2(49). P. 58-65.
6. Smagin A. V. K termodinamicheskoy teorii vodoudержivayuschej sposobnosti i dispersnosti pochv // Pochvovedenie. 2018. № 7. P. 836-851.
7. Shein E. V. Teoreticheskie osnovy gidrologii pochv v trudah A. A. Rode i sovremennye podhody k opisaniyu dvizheniya i ravnovesiya vlagi v pochvah // Byulleten' Pochvennogo instituta imeni V. V. Dokuchaeva. 2016. № 83. P. 11-21.
8. A pH based pedotransfer function for scaling saturated hydraulic conductivity reduction: Improved estimation of hydraulic dynamics in HYDRUS / A. Ali, A. J. W. Biggs, J. Šimůnek, J. McL. Bennett // Vadose Zone Journal. 2020. V. 18(1). 190072. doi: 10.2136/vzj2019.07.0072
9. Modeling of horizontal water redistribution in an unsaturated soil / L. Zhuang, S. M. Hassanizadeh, M. Th. van Genuchten, A. Leijnse, A. Raoof, C. Qin // Vadose Zone J. 2016. V. 15(3). doi: 10.2136/vzj2015.08.0109
10. Šimůnek J., van Genuchten M. Th., Šejna M. The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media // Technical Manual. Prague: PC-Progress, 2018.
11. Šimůnek J., van Genuchten M. Th., Šejna M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages // Vadose Zone Journal. 2016. V. 15(8), P. 25. doi: 10.2136/vzj2016.04.0033

Author information

Salugin Alexander Nikolaevich, chief researcher of the laboratory of hydrology agroecological and adaptive environmental management FNTS Agroecology Russian Academy of Sciences (Russia, 400062, Volgograd, PR-t Universitetskij, 97), candidate of physico-mathematical Sciences, doctor of agricultural Sciences. E-mail: saluginan@mail.ru

Ryzhova Tatyana Anatoljevna, post-graduate student of the Department of Mathematical modeling and Informatics (26 Universitetskij Ave., Volgograd, 400002, Russian Federation) <https://orcid.org/0000-0001-5471-2474>, trud-vgsxa@yandex.ru

Информация об авторах

Салугин Александр Николаевич, главный научный сотрудник лаборатории гидрологии агролесоландшафтов и адаптивного природопользования ФНЦ агроэкологии РАН (РФ, 400062, г. Волгоград, пр-т Университетский, 97), кандидат физико-математических наук, доктор сельскохозяйственных наук. E-mail: saluginan@mail.ru

Рыжова Татьяна Анатольевна, аспирант кафедры «Математическое моделирование и информатика» (РФ, 400002, г. Волгоград, пр. Университетский, д.26.) <https://orcid.org/0000-0001-5471-2474>, trud-vgsxa@yandex.ru.