



Пограничные случаи модели сорбции паров воды почвами с функцией источника-стока

✉ Фёдоров Ю.И., Павлидис В.Д.

Оренбургский государственный аграрный университет, Институт управления рисками и комплексной безопасности

Оренбург, Россия

✉ e-mail: yurf0023@mail.ru

Для разработанной авторами неклассической математической модели процесса сорбции водяных паров поверхностью почвы с источником-стоком дан теоретический анализ влияния источника-стока на динамику сорбционного процесса для одного частного (пограничного) случая. В отличие от модели М. Гризмера, в которой уравнение сорбции однородное, в предложенной модели уравнение сорбции неоднородное – присутствует постоянный ненулевой свободный член, который рассматривается как параметр внешнего воздействия на систему (функция источника-стока). Параметр позволяет управлять сорбционным процессом, изменяя его характеристики. Решение модельного уравнения определяет основное аналитическое соотношение для анализа динамики объемной влажности почвы как функции времени. Поведение функции объемной влажности определяется влиянием выбранного значения параметра, а также соотношением между постоянной начальной и равновесной влажностью, для которого возможны три варианта. В результате исследования динамики объемной влажности почвенной системы согласно разработанной модели установлено, что в этом случае сорбционный процесс будет протекать в трех режимах: первый режим моделируемого процесса – это ограниченный по времени конечный процесс критического иссушения почвы; второй режим – это стационарный процесс, когда объемная влажность почвы с течением времени не меняется и остается равной начальной влажности (процесс асимптотически вырождается); в третьем случае рассматриваемая сорбционная модель описывает неограниченный во времени асимптотический процесс падения объемной влажности почвы от начального значения до предельного (ненулевого) значения.

Ключевые слова: математическая модель, динамика сорбции паров воды почвами, источник-сток

Border-line cases of the water vapor sorption model of the soils with source-drainage function

✉ Fedorov Yu.I., Pavlidis V.D.

Orenburg State Agrarian University, Institute of Risk Management and Integrated Security

Orenburg, Russia

✉ e-mail: yurf0023@mail.ru

A theoretical analysis of the influence of the source-drain on the dynamics of the sorption process for one particular (border-line) case is given for the non-classical mathematical model of the process of water vapor sorption by the soil surface with a source-drain developed by the authors. Unlike the model of M. Griesmer, in which the sorption equation is homogeneous, in the proposed model the sorption equation is heterogeneous – there is a constant non-zero free term, which is considered as a parameter of external influence on the system (source-drain function). The parameter allows controlling the sorption process by changing its characteristics. The solution of the model equation determines the basic analytical relationship for analyzing the dynamics of soil volumetric water content as a

function of time. The behavior of the volumetric water content function is determined by the influence of the selected parameter value as well as by the relationship between constant initial and equilibrium moisture, for which three variants are possible. As a result of studying the dynamics of soil system volumetric moisture according to the developed model, it has been established that in this case the sorption process will proceed in three modes: the first mode of the modeled process is a time-limited, finite process of critical soil drying; the second mode is a stationary process, when soil volumetric water content does not change over time and remains equal to the initial moisture (the process asymptotically degenerates); in the third case, the considered sorption model describes a time-unlimited asymptotic process of soil volumetric water content fall from the initial value to the limiting (non-zero) value.

Keywords: mathematical model, dynamics of water vapor sorption by soils, source-drainage

Для цитирования: Фёдоров Ю.И., Павлидис В.Д. Пограничные случаи модели сорбции паров воды почвами с функцией источника-стока // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2024. Т. 54. № 10. С. 5–12. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-10-1>

For citation: Fedorov Yu.I., Pavlidis V.D. Border-line cases of the water vapor sorption model of the soils with source-drainage function. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki* = *Siberian Herald of Agricultural Science*, 2024, vol. 54, no. 10, pp. 5–12. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-10-1>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема количественного описания процессов поглощения и испарения газов и паров поверхностью почвы – одна из важнейших в современном агропочвоведении и агроэкологии. Необходимость исследований в этом направлении связана с задачами агрофизической и экологической оценки плодородия почвы, сохранения ее физического плодородия. Физическое плодородие почв и продуктивность агрокультур во многом зависят от состояния почвенного воздуха. Ключевым компонентом почвенного воздуха являются пары воды. Оптимальное содержание воздуха и влаги в почве способствует росту растительных культур и микроорганизмов, активности двух основных экологических функций почвы – фотосинтезу и разложению органических веществ¹. Кроме того, в современной науке сформировалось представление о роли

почвы в глобальном регулировании газового режима атмосферы планеты как главной экологической газовой функции, в связи с чем возросла важность исследований процессов сорбции газов и паров поверхностью почвы в рамках экологической безопасности сельскохозяйственного производства^{2,3} [1, 2].

В связи с важной для агропочвоведения и агроэкологии ролью процессов в газовой фазе почвенной системы изучению проблем в этой области посвящено множество исследований. Библиография по исследованиям сорбции почвенных газов приведена в работах⁴ [2], по адсорбции водяных паров почвами – в работах (см. сноску 3)^{5–7} [3–8]. Некоторые аспекты динамики сорбции газов и паров рассматривались нами ранее в работе [9].

Цель исследований – количественная оценка влияния фактора источника-стока на сорбционный процесс водяных паров почвой

¹Кудеяров В.Н., Хакимов Ф.И., Деева Н.Ф. и др. Оценка дыхания почв России // Почвоведение. 1995. №1. С. 33–42.

²Заварзин Г.А. Взаимодействие геосферы и биосферы // Экология и почвы. Пушино. 1998. С. 139–153.

³Капинос В.А., Тонких А.П. Определение полной изотермы паров воды почвами // Почвоведение. 1986. № 10. С. 107–113.

⁴Brunauer S., Emmet P.H., Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers // J. Amer. Chem. Soc. 1938. Vol. 60. P. 309–319.

⁵Зуев В.С. К методике измерения и расчета параметров уравнения БЭТ по сорбции водяного пара // Научно-технический бюллетень по агрономической физике. 1986. № 69. С. 54–58.

⁶Паченский Я.А. Математические модели процессов в мелиорируемых почвах. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. 85 с.

⁷Grismer M.E. Kinetics of water vapor adsorption on soils // Soil Sci. 1987. Vol. 143. N 5. P. 367–371. Available from: Mark E Grismer Retrieved on: 23 June 2015. Printed in U.S.A.

в рамках авторской неклассической математической модели сорбции паров воды почвами с источником-стоком.

Основная задача состоит в исследовании влияния функции источника-стока в сорбционной модели на динамику объемной влажности почвенной системы для одного частного (пограничного) случая изучаемой модели, который определяется указанными в работе математическими соотношениями.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В данной работе изучается динамика процесса адсорбции (десорбции) водяных паров поверхностью почв в авторской математической модели с функцией источника-стока. В работе [9] нами предложена неклассическая математическая модель динамики адсорбции водяных паров почвами с источником-стоком в виде задачи с начальным условием для неоднородного нелинейного дифференциального уравнения со стационарным свободным членом f в качестве функции источника-стока, являющимся параметром сорбционного процесса:

$$\theta'(t) = k \left(1 - \frac{\theta}{\theta_p} \right) + f, \quad \theta(0) = \theta_0, \quad (1)$$

где $\theta'(t)$ – объемная влажность почвы в момент времени t , θ_p – постоянная равновесная влажность (как системный фактор, определяющий ограничения на динамику объемной влажности), k – константа модели, параметр скорости адсорбции, θ_0 – постоянная начальная влажность.

Эта модель является развитием, обобщением модели сорбции паров воды, предложенной профессором Калифорнийского университета М. Гризмером (см. сноску 7). В отличие от модели Гризмера, в которой уравнение сорбции однородное, в предложенной нами модели уравнение сорбции неоднородное – присутствует постоянный ненулевой свободный член f , оказывающий влияние на сорбционный процесс и рассматриваемый как параметр моделируемого процесса (функция источника-стока). Параметр f позволяет управлять сорбционным процессом,

изменяя его характеристики (посредством изменения значений параметров θ_0 и f), что, по нашему мнению, расширяет возможности моделирования сорбционных процессов.

Нами получено аналитическое решение задачи (1). Представив уравнение (1) в стандартной для теории дифференциальных уравнений форме, запишем задачу (1) в виде

$$\theta'(t) - k\theta + \frac{k}{\theta_p}\theta^2 = f, \quad \theta(0) = \theta_0, \quad (2)$$

Уравнение (2) является неоднородным уравнением Риккати с постоянными коэффициентами и стационарным свободным членом. Уравнение Риккати в общем случае не сводится к квадратурам. Однако условие постоянства коэффициентов и параметра f уравнения (2) позволяет проинтегрировать его в конечном виде. Классическое уравнение сорбции водяных паров обычно интегрируют разделением переменных. Нами предложен следующий эффективный аппарат для интегрирования уравнения (2).

После замены неизвестной функции $\theta(t)$ в уравнении (2)

$$\theta(t) = \frac{\theta_p}{k} \frac{z'}{z}, \quad (3)$$

задача (2) приводится к задаче Коши для линейного однородного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами

$$z'' - kz' - f \frac{k}{\theta_p} z = 0, \quad z(0) = 1, \quad z'(0) = k \frac{\theta_0}{\theta_p}. \quad (4)$$

Общее решение уравнения (4) находится в соответствии с общей теорией таких уравнений и является линейной комбинацией решений фундаментальной системы $z_1(t)$ и $z_2(t)$:

$$z(t) = C_1 z_1(t) + C_2 z_2(t), \quad (5)$$

где C_1 и C_2 – произвольные постоянные. Выбор фундаментальной системы решений определяется знаком дискриминанта D характеристического многочлена уравнения (4), его корнями λ_1 и λ_2 :

$$\begin{aligned} D &= k^2 + \frac{4kf}{\theta_p} = k^2 \left(1 + \frac{4f}{k\theta_p} \right), \\ \lambda_1 &= \frac{k}{2} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4f}{k\theta_p}} \right), \\ \lambda_2 &= \frac{k}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4f}{k\theta_p}} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Решение задачи Коши (4) находится по формуле (5), в которой C_1 и C_2 – числа, найденные с помощью начальных значений (4) из системы уравнений

$$\begin{cases} C_1 z_1(0) + C_2 z_2(0) = 1, \\ C_1 z_1'(0) + C_2 z_2'(0) = k \frac{\theta_0}{\theta_p}. \end{cases} \quad (7)$$

В работе [9] нами показано, что в зависимости от промежутка, которому принадлежат значения параметра f модели, который в свою очередь определяется знаком дискриминанта D , найденное решение $z(t)$ будет представлено тремя разными формулами при $D > 0$, $D = 0$, $D < 0$. Здесь подробно изучено поведение моделируемого процесса при $D = 0$.

При $D = 0$ соотношения (6) для дискриминанта, корней характеристического многочлена и решения задачи (4) примут соответственно вид

$$D = 0, \text{ т. е. }, f = -\frac{k\theta_p}{4}, \lambda_1 = \lambda_2 = \frac{k}{2}, \quad (8)$$

$$z(t) = \exp\left(\frac{k}{2}t\right) + k\left(\frac{\theta_0}{\theta_p} - \frac{1}{2}\right)t \exp\left(\frac{k}{2}t\right). \quad (9)$$

Подставив (9) в (3), найдем решение $\theta(t)$ задачи (1)

$$\theta(t) = \frac{\theta_p}{2} \frac{2\theta_0 - k\left(\frac{\theta_p}{2} - \theta_0\right)t}{\theta_p - k\left(\frac{\theta_p}{2} - \theta_0\right)t}. \quad (10)$$

Формула (10) является основным аналитическим соотношением для анализа динамики ключевой характеристики рассматриваемого сорбционного процесса – объемной влажности почвы $\theta(t)$ в момент времени t .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе проведена оценка динамики объемной влажности $\theta(t)$ почвы для частного (особого, пограничного) случая математической модели сорбции паров воды почвами с источником-стоком, когда значение параметра f определяется соотношением (8), т. е. при $D=0$. С помощью найденной формулы (10) для объемной влажности $\theta(t)$ почвенной системы выполнен анализ динамики $\theta(t)$. Поведение $\theta(t)$ определяется влиянием выбранного значения (8) параметра f , а также соотношением между θ_0 и $\frac{\theta_p}{2}$, у которого возможны три варианта:

$$0 < \theta_0 < \frac{\theta_p}{2}, \quad \theta_0 = \frac{\theta_p}{2}, \quad \frac{\theta_p}{2} < \theta_0 \leq \theta_p.$$

Приведем результаты этого анализа:

1) $0 < \theta_0 < \frac{\theta_p}{2}$. Так как характер кривой сорбции (10) будет определяться соотношением между θ_0 и $\frac{\theta_p}{2}$, то удобно ввести коэффициент, характеризующий это соотношение

$$r = \theta_0 / \frac{\theta_p}{2} = \frac{2\theta_0}{\theta_p}. \quad (11)$$

Так как $0 < \theta_0 < \frac{\theta_p}{2}$, то $0 < r < 1$. Поэтому в рассматриваемом случае будет

$$\theta_0 = r \frac{\theta_p}{2}, \quad 0 < r < 1. \quad (12)$$

Подставим в формулу (10) вместо θ_0 его выражения из (12) и приведем ее к виду

$$\theta(t) = \frac{\theta_p}{2} \frac{2r - k(1-r)t}{2 - k(1-r)t}, \quad 0 < r < 1. \quad (13)$$

Разложив дробно-линейную функцию (13) в сумму целой части и правильной дроби

$$\theta(t) = \frac{\theta_p}{2} \left(\frac{2-2r}{k(1-r)} \frac{1}{(t - 2/k(1-r))} + 1 \right),$$

закключаем, что графиком функции $\theta(t)$ (13) является гиперболa с горизонтальной и вертикальной асимптотами

$$\theta = \frac{\theta_p}{2} \text{ и } t = \frac{2}{k(1-r)}, \text{ т. е. } \left(t = \frac{\theta_p}{2} \frac{4}{k(\theta_p - 2\theta_0)} \right)$$

соответственно. Но интерпретировать функцию (13) как объемную влажность почвы $\theta(t)$ в рассматриваемом сорбционном процессе можно лишь на промежутке времени от начала процесса до момента обращения функции $\theta(t)$ в нуль, т. е. на промежутке $[0; t_{кр}]$

$$t_{кр} = \frac{4\theta_0}{k(\theta_p - 2\theta_0)}. \quad (14)$$

К моменту времени $t_{кр}$ наступает критическое иссушение почвы агроландшафта.

В работе М. Гризмера (см. сноску 7) описаны результаты кинетических экспериментов по изучению различных характеристик адсорбции паров воды мелкозернистыми почвами. Взяв значения ключевых параметров из экспериментов Гризмера по адсорбции водяных паров бентонитом Волкляя, приведем при этих параметрах вид функции $\theta(t)$ (13) объемной влажности почвы в нашей модели и кривые адсорбции при различных r :

$$\theta_p = 0,2184, \frac{\theta_p}{2} = 0,1092, k = 1,02, \\ \theta(t) = 0,1092 \frac{2r - 1,02(1-r)t}{2 - 1,02(1-r)t}, \quad 0 < r < 1. \quad (15)$$

График функции (15) при $r = 0,78$, т. е. при $\theta_0 = 0,78 \frac{\theta_p}{2}$, показан на рис. 1, при этом $t_{кр} = 6,952$ (мин). Сплошной линией изображена часть графика функции (15) на промежутке времени $[0; t_{кр}]$, которая собственно и

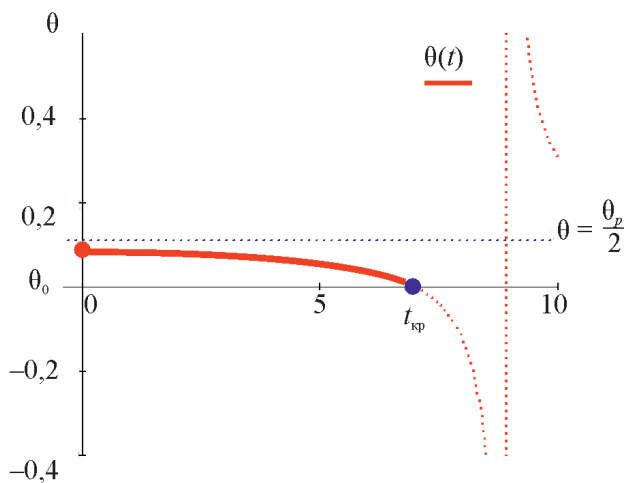


Рис. 1. График функции $\theta(t)$: $\theta_0 = 0,78 \frac{\theta_p}{2}$, $r = 0,78$

Fig. 1. Function graph $\theta(t)$: $\theta_0 = 0,78 \frac{\theta_p}{2}$, $r = 0,78$

интерпретируется как кривая сорбции, описывающая рассматриваемый сорбционный процесс. Функция $\theta(t)$ на промежутке $[0; t_{кр}]$ выпукла вверх, монотонно убывает от θ_0 до $\theta(t_{кр}) = 0$. Части графика на рис. 1, изображенные пунктиром, в рассматриваемой модели физического смысла не имеют. Процесс превращается в ограниченный по времени, конечный процесс критического иссушения почвы.

Кривые сорбции в рассматриваемом случае ($0 < \theta_0 < \frac{\theta_p}{2}$) при различных r , $0 < r < 1$, показаны на рис. 2.

При значениях θ_0 много меньше, чем $\theta_0/2$, длительность $t_{кр}$ промежутка времени до критического иссушения почвы крайне мала, причем $t_{кр} \rightarrow 0$ при $\theta_0 \rightarrow 0$: происходит быстротекущий процесс обезвоживания почвы. Например, при $r = 0,2$, т. е. при $\theta_0 = 0,2 \frac{\theta_p}{2}$, время $t_{кр} = 0,49$ (мин), а при $r = 0,78$, т. е. при $\theta_0 = 0,78 \frac{\theta_p}{2}$, $t_{кр} = 6,952$ (мин). При увеличении постоянной начальной влажности θ_0 от $\theta_0 = 0$ до $\theta_0 = \frac{\theta_p}{2}$ (в случае $0 < \theta_0 < \frac{\theta_p}{2}$) величина $t_{кр}$ будет неограниченно расти, причем $t_{кр} \rightarrow +\infty$ при $\theta_0 \rightarrow \frac{\theta_p}{2} - 0$ – процесс обезвоживания почвы становится более длительным, затяжным, но конечным. Например, при $r = 0,995$, т. е. при $\theta_0 = 0,995 \frac{\theta_p}{2}$, $t_{кр} = 390,196$ (мин).

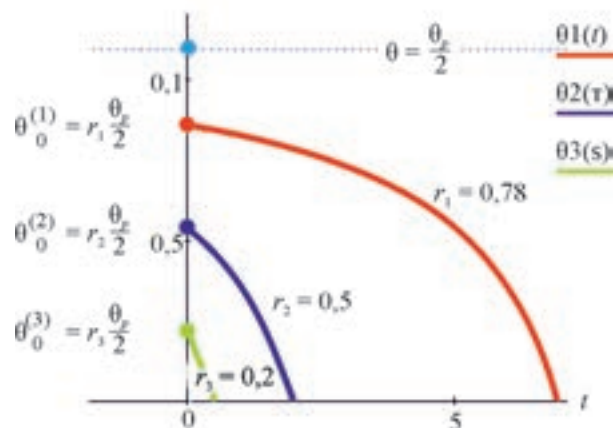


Рис. 2. График функции $\theta(t)$: $0 < \theta_0 < \frac{\theta_p}{2}$, $0 < r < 1$

Fig. 2. Function graph $\theta(t)$: $0 < \theta_0 < \frac{\theta_p}{2}$, $0 < r < 1$

Таким образом, моделируемый процесс в первом случае ($0 < \theta_0 < \frac{\theta_p}{2}$) – это ограниченный по времени, конечный процесс критического иссушения почвы.

Во втором случае $\theta_0 = \frac{\theta_p}{2}$, т.е. $2\theta_0 = \theta_p$. Процесс становится стационарным, так как объемная влажность почвы с течением времени не меняется и остается равной начальной влажности θ_0 : $\theta(t) = \theta_0 = \frac{\theta_p}{2}$. Процесс асимптотически вырождается, поскольку линия адсорбции в этом случае совпадает с горизонтальной асимптотой кривых адсорбции при $\theta_0 < \frac{\theta_p}{2}$ и $\theta_0 > \frac{\theta_p}{2}$.

В третьем случае $\frac{\theta_p}{2} < \theta_0 \leq \theta_p$. Как и в первом случае соотношение между θ_0 и $\frac{\theta_p}{2}$ будем характеризовать коэффициентом r в формуле (11), диапазон которого изменится:

$$\theta_0 = r \frac{\theta_p}{2}, \quad 1 < r \leq 2. \quad (16)$$

Формулу объемной влажности $\theta(t)$ почвенной системы (как и в первом случае) возьмем в виде (13), но с учетом нового диапазона $1 < r < 2$:

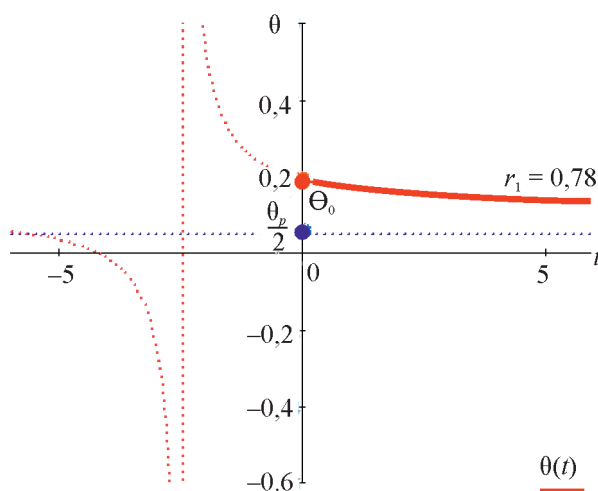


Рис. 3. График функции $\theta(t)$: $\frac{\theta_p}{2} < \theta_0 \leq \theta_p$, $r = 1,8$

Fig. 3. Function graph $\theta(t)$: $\frac{\theta_p}{2} < \theta_0 \leq \theta_p$, $r = 1,8$

$$\theta(t) = \frac{\theta_p}{2} \frac{2r - k(1-r)t}{2 - k(1-r)t}, \quad 1 < r < 2. \quad (17)$$

Функция $\theta(t)$ (17) определена на промежутке времени $t \in [0; +\infty)$, выпуклая вниз, монотонно убывает от начального значения θ_0 асимптотически стремясь к $\frac{\theta_p}{2}$ при $t \rightarrow +\infty$.

Сорбционная модель в этом случае описывает неограниченный во времени асимптотический процесс падения объемной влажности почвы $\theta(t)$ от значения θ_0 до предельного (ненулевого) значения $\frac{\theta_p}{2}$.

Функция $\theta(t)$ (17) с параметрами, взятыми из работы М. Гризмера (см. сноску 7) ($\theta_p = 0,2184$, $\frac{\theta_p}{2} = 0,1092$, $k = 1,02$), имеет вид

$$\theta(t) = 0,1092 \frac{2r - 1,02(1-r)t}{2 - 1,02(1-r)t}, \quad 1 < r \leq 2. \quad (18)$$

На рис. 3 изображен график функции (18) при $r = 1,8$. Сплошной линией изображена одна часть этого графика, которая описывает рассматриваемый в третьем случае сорбционный процесс. Другая часть графика, изображенная пунктиром, в рассматриваемой модели физического смысла не имеет.

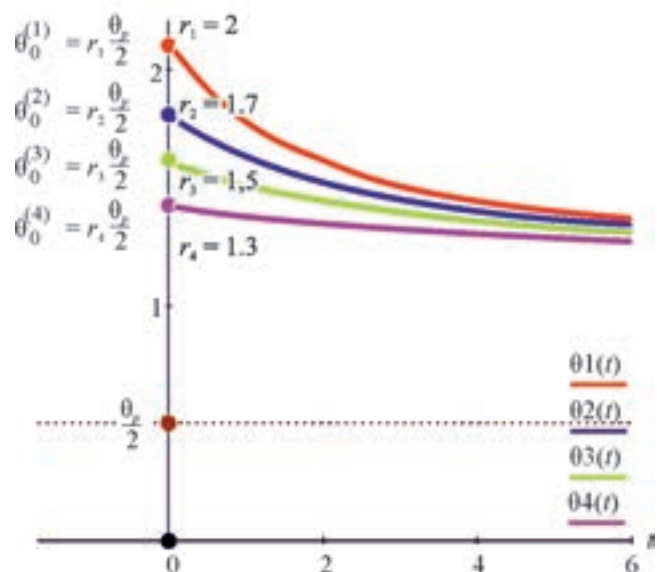


Рис. 4. График функции $\theta(t)$: $\frac{\theta_p}{2} < \theta_0 \leq \theta_p$, $1 < r \leq 2$

Fig. 4. Function graph $\theta(t)$: $\frac{\theta_p}{2} < \theta_0 \leq \theta_p$, $1 < r \leq 2$

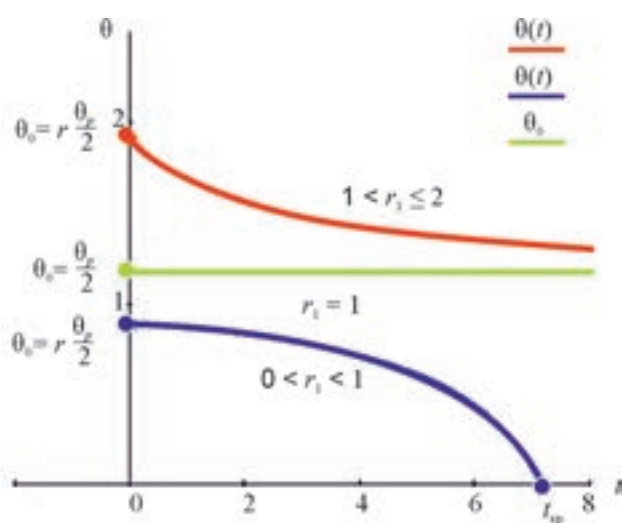


Рис. 5. График функции $\theta(t)$: $0 < \theta_0 \leq \theta_p$, $0 < r \leq 2$

Fig. 5. Function graph $\theta(t)$: $0 < \theta_0 \leq \theta_p$, $0 < r \leq 2$

Несколько кривых адсорбции в рассматриваемом случае ($\frac{\theta_p}{2} < \theta_0 \leq \theta_p$) при различных r на рис. 4 демонстрируют изменение динамики объемной влажности $\theta(t)$ в зависимости от r , $1 < r \leq 2$. Предельная кривая при $r = 2$ ограничивает сверху все семейство кривых (18).

Процесс в целом во всем диапазоне $0 < r \leq 2$ характеризуют линии сорбции из разных диапазонов r на рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье для авторской математической модели процесса сорбции водяных паров поверхностью почвы с источником-стоком выполнен подробный математический анализ динамики сорбционного процесса в одном ее частном (особом, переходном) случае, который определяется условием $D=0$. В этом случае динамика объемной влажности $\theta(t)$ почвенной системы определяется не только выбранными параметрами модели, но и соотношением между θ_0 и $\frac{\theta_p}{2}$, у которого возможны три варианта. Поэтому в результате этого анализа установлено, что сорбционный процесс взаимодействия водяного пара и твердой фазы почвы будет протекать в одном из трех возможных режимов. В первом случае ($0 < \theta_0 < \frac{\theta_p}{2}$) моделируемый процесс – это

ограниченный по времени, конечный процесс критического иссушения почвы; во втором случае ($\theta_0 = \frac{\theta_p}{2}$) процесс стационарный, объемная влажность почвы с течением времени не меняется и остается равной начальной влажности (процесс асимптотически вырождается); в третьем случае ($\frac{\theta_p}{2} < \theta_0 \leq \theta_p$) сорбционная модель описывает неограниченный во времени асимптотический процесс падения объемной влажности почвы $\theta(t)$ от начального значения θ_0 до предельного значения $\frac{\theta_p}{2}$.

Результаты проведенных исследований расширяют знания о рассматриваемых процессах и могут быть применены для дальнейших исследований динамики влажности в профиле мелиорируемых и текстурно-дифференцированных почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев И.В., Ковалева Н.О. Экологические функции почв и вызовы современности // Экологический вестник Северного Кавказа. 2020. Т. 16. № 2. С. 4–16.
2. Смагин А.В. Газовая функция почв // Почвоведение. 2000. № 10. С. 1211–1223.
3. Моисеев К.Г., Терлеев В.В. Применение фрактального моделирования в гидрофизике почв // Таврический вестник аграрной науки. 2022. № 3 (31). С. 126–137.
4. Моисеев К.Г., Терлеев В.В. Влияние увеличения количества осадков на структуру почвенного покрова и текстурные свойства почв // Агрофизика. 2019. № 4. С. 22–30. DOI: 10.25695/AGRPH.2019.04.04.
5. Моисеев К.Г. Определение удельной поверхности почв на основе величины гигроскопической влажности // Почвоведение. 2008. № 7. С. 845–849.
6. Харитонова Г.В., Витязев В.Г., Лапекина С.И. Математическая модель адсорбции паров воды почвами // Почвоведение. 2010. № 2. С. 196–205.
7. Харитонова Г.В., Шеин Е.В., Витязев В.Г., Лапекина С.И. Уравнение для описания полной изотермы адсорбции паров воды почвами // Вестник Московского университета. Сер. 17, Почвоведение. 2003. № 1. С. 8–14.

8. Харитонов Г.В., Витязев В.Г. Изотермы сорбции водяного пара почвами // Почвоведение. 2000. № 4. С. 446–453.
9. Федоров Ю.И., Павлидис В.Д., Чкалова М.В. Неклассическая кинетическая математическая модель адсорбции паров воды почвами // Агрофизика. 2023. № 1. С. 57–63. DOI: 10.25695/AGRPH.2023.01.08.

REFERENCES

1. Kovalev I.V., Kovaleva N.O. Ecological functions of soils and new challenges. *Ekologicheskii vestnik Severnogo Kavkaza = The North Caucasus Ecological Herald*, 2020, vol. 16, no. 2, pp. 4–16. (In Russian).
2. Smagin A.V. The gas function of soils. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*, 2000, no. 10, pp. 1211–1223. (In Russian).
3. Moiseev K.G., Terleev V.V. Application of fractal simulation in soil hydrophysics. *Tavrisheskii vestnik agrarnoi nauki = Taurida Herald of the Agrarian Sciences*, 2022, no. 3 (31), pp. 126–137. (In Russian).
4. Moiseev K.G., Terleev V.V. The impact of increased precipitation on the structure of soil and soil texture. *Agrofizika = Agrophysica*, 2019,

no. 4, pp. 22–30. (In Russian). DOI: 10.25695/AGRPH.2019.04.04.

5. Moiseev K.G. Determination of the specific soil surface area from the hygroscopic water content. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*, 2008, no. 7, pp. 845–849. (In Russian).
6. Kharitonova G.V., Vityazev V.G., Lapekina S.I. A mathematical model for the adsorption of water vapor by soils. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*, 2010, no. 2, pp. 196–205.
7. Kharitonova G.V., Shein E.V., Vityazev V.G., Lapekina S.I. Equation to describe complete isotherms of adsorption of water vapor by soils. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 17, Pochvovedenie = Moscow University Bulletin. Series 17. Soil science*, 2003, no. 1, pp. 8–14. (In Russian).
8. Kharitonova G.V., Vityazev V.G. Isotherms of adsorption of water vapor by soils. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*, 2000, no. 4, pp. 446–453. (In Russian).
9. Fedorov Yu.I., Pavlidis V.D., Chkalova M.V. Non-classical kinetic mathematical model of water vapor adsorption by soils. *Agrofizika = Agrophysica*, 2023, no. 1, pp. 57–63. (In Russian). DOI: 10.25695/AGRPH.2023.01.08.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

✉ **Фёдоров Ю.И.**, кандидат физико-математических наук, доцент; **адрес для переписки:** Россия, 460014, Оренбург, ул. Челюскинцев, 18; e-mail: yurf0023@mail.ru

Павлидис В.Д., кандидат физико-математических наук, профессор

AUTHOR INFORMATION

✉ **Yuri I. Fedorov**, Candidate of Science in Physics and Mathematics, Associate Professor; **address:** 18, Chelyuskintsev St., Orenburg, 460014, Russia; e-mail: yurf0023@mail.ru

Victoria D. Pavlidis, Candidate of Science in Physics and Mathematics, Professor

Дата поступления статьи / Received by the editors 07.08.2024
Дата принятия к публикации / Accepted for publication 02.10.2024
Дата публикации / Published 20.11.2024