

Построение модели движения внутрипочвенной влаги в склоновых обрабатываемых землях

© 2025. А. А. Михайлин 

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет им. М. И. Платова», г. Новочеркасск, Российская Федерация

Недостаточная изученность динамики влагопереноса как в почве, разрыхленной рабочими органами орудия, так и в зоне необрабатываемой внутрипочвенной стенки в условиях меняющегося к влагодефицитному типу климата юга России, вызвала необходимость разработки математической модели внутрипочвенного влагопереноса. Отличительной особенностью этой модели является исследование влагопереноса в зоне обработанного новым мелиоративным способом верхнего слоя почвы глубиной 0,60 м разработанным универсальным почвообрабатывающим орудием для обработки склоновых и равнинных земель. Для исследования процесса увлажнения в обработанном новым способом пласта почвы на склоне были приняты следующие допущения: скелет грунта геометрически неизменяем; в рассматриваемой системе исключается гистерезис; влага внутри почвы не сжимается; давление воздуха внутри обработанного почвенного горизонта равно с атмосферным; капиллярные и гравитационные явления являются основной причиной движения влаги внутри обработанного пласта; внутрипочвенный влагоперенос относим к изотермическим процессам, используется декартова система координат, при этом ось z направлена вертикально вверх. Данные допущения позволяют рассматривать в модели движения внутрипочвенной влаги только динамику капиллярных сил и сорбции, происходящих из-за увлажнения почвы. В результате предложена математическая модель внутрипочвенного влагопереноса на базе уравнения Навье-Стокса для движения воды в пористой среде. Это позволяет определять основные параметры динамики влагопереноса в рассматриваемом слое: коэффициенты диффузивности, влагопроводности и капиллярно-сорбционного потенциала. Разработана компьютерная программа для решения краевой задачи динамики – внутрипочвенного влагопереноса на склоне с учётом неоднородных структур, полученных при обработке почвы новым способом.

Ключевые слова: мелиоративная обработка почвы, глубокое рыхление, склоновые земли, математическая модель, влажность, влагоперенос, диффузия, капиллярно-сорбционный потенциал, потенциал почвенной воды, движение влаги в почве

Благодарности: работа выполнена без финансового обеспечения в рамках инициативной тематики.

Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Михайлин А. А. Построение модели движения внутрипочвенной влаги в склоновых обрабатываемых землях. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(1):196–207.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.196-207>

Поступила: 09.12.2024

Принята к публикации: 14.02.2025

Опубликована онлайн: 26.02.2025

Construction of a model of subsoil moisture movement in cultivated slope lands

© 2025. Andrey A. Mikhaylin 

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation

Insufficient study of the dynamics of moisture movement both in the soil loosened by the tillage tool and in the zone of uncultivated subsoil wall in the conditions of moisture deficient south of Russia necessitated for development of a mathematical model of subsoil moisture transfer. A distinctive feature of this model is the study of moisture transfer in the zone of the upper soil layer of 0.60 m by the developed universal tillage tool for cultivating of sloping and plain lands. To study the moistening process in the slope soil layer treated by the new method, the following assumptions were made: the soil skeleton was geometrically unchanged; hysteresis was excluded in the system under consideration; the moisture inside the soil was not compressed; the air pressure inside the treated soil horizon was equal to the atmospheric pressure; capillary and gravitational phenomena were the main causes of moisture movement inside the treated layer; subsoil moisture transfer was related to isothermal processes; the Cartesian coordinate system was used, and the z-axis was directed vertically upwards. These assumptions made it possible to consider in the model of subsoil moisture movement only the dynamics of capillary forces and sorption occurring due to soil moistening. As the result, a mathematical model of subsoil moisture transfer was proposed on the basis of the Navier-Stokes equation for water movement in a porous medium. This let to determine the main parameters of the moisture transfer dynamics in the layer under consideration: the coefficients of diffusivity, moisture conductivity and capillary absorption capacity. At the same time, a computer program was developed to solve the boundary value problem of dynamics – subsoil moisture transfer on a slope, taking into account the heterogeneous structures obtained during soil treatment using a new method.

Keywords: reclamation treatment of soil, chiseling, slope lands, mathematical model, moisture, moisture transfer, diffusion, capillary absorption capacity, matric potential, moisture movement in soil

Acknowledgements: the work was done without financial support in the framework of the initiative topics.
The author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the author has stated that there is no conflict of interest.

For citations: Mikhaylin A. A. Construction of a model of subsoil moisture movement in cultivated slope lands. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):196–207. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.196-207>

Received: 09.12.2024

Accepted for publication: 14.02.2025

Published online: 26.02.2025

На обрабатываемых склоновых землях из-за негативного антропогенного воздействия возникает переуплотнение, приводящее к низкой скважности подпахотных горизонтов, что способствует появлению таких явлений, как поверхностный смыв и дефляция, что, в конечном счёте, и определяет их низкое плодородие. Вследствие изменения климата на юге России данная ситуация усугубляется низким дебетом атмосферной и внутрипочвенной влаги¹. Все это отражается в потере потенциально возможной высокой продуктивности земель. Длительное воздействие техногенной нагрузки на обрабатываемые агроландшафты может привести к окончательной деградации и выводу таких участков из фонда обрабатываемых земель.

Представленный ранее метод концептуального конструирования [1, 2] относится к области информационных технологий и соответствует парадигме целостности всего жизненного цикла исследуемого изделия^{2, 3}. Такой подход позволил разработать на объектном уровне базовый инвариант оптимальной структуры универсального почвообрабатывающего орудия и новый мелиоративный способ обработки склоновых земель, направленный на удержание внутрипочвенной влаги на склоне, в рамках системы мелиоративной обработки склоновых и равнинных земель (СМОСРЗ) в условиях меняющегося климата юга России к влагедефицитному типу [3, 4, 5].

Следующий этап исследования в рамках диалектического подхода предполагает переход от объектного уровня к конкретному, где для каждого объекта, как элемента структуры, определяются оптимальные для его эффективного функционирования значения параметров. Достижение заявленной в работе [1] глобальной цели в значительной мере зависит от создания в обработанной орудием почве соответствующих условий обеспечения влагой корневой системы

выращиваемых сельскохозяйственных культур. Недостаточная изученность динамики влагопереноса как в области разрыхленной рабочими органами орудия почвы, так и в зоне необрабатываемой внутрипочвенной стенки, сдерживает окончательное решение проблемы повышения эффективности технологических процессов и рабочих органов почвообрабатывающих орудий. В связи с вышеизложенным для предотвращения негативного влияния процессов деградации обрабатываемых почв и аккумуляции внутрипочвенной влаги на склоновых землях юга России в условиях изменения климата, а также восстановления их продуктивности и соответствующего устойчивого производства сельхозпродукции, необходимо создание на обрабатываемых склонах внутрипочвенных преград, образующихся на основе глубокого рыхления (до 0,60 м) слоя почвы [3, 4, 5]. Реализация этих положений требует создания инновационной системы деформаторов универсального глубокорыхлителя для обработки склоновых и равнинных агроландшафтов [6] и соответствующего исследования динамики влагопереноса на основе построения математической модели внутрипочвенного влагопереноса. Отличительными особенностями которой является исследование верхнего слоя почвы глубиной 0,60 м, обработанного новым мелиоративным способом с устройством внутрипочвенных стенок из переуплотнённой необработанной земли [7].

Цель исследований – разработка математической модели для определения параметров динамики влагопереноса: коэффициентов диффузивности, влагопроводности и капиллярно-сорбционного потенциала, а также разработка программы для решения краевой задачи динамики – внутрипочвенного влагопереноса на склоне, учитывая неоднородные структуры, полученные при обработке новым способом.

¹Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: общее резюме. М., 2014. 60 с.
URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2016/od2/od2.pdf>

²Гаскаров Д. В. Интеллектуальные информационные системы. М.: Высшая школа, 2003. 431 с.

³Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем. М.: Высшая школа, 2001. 343 с.

Научная новизна – разработка математической модели, отражающей внутрипочвенный влагоперенос, отличающейся тем, что в ней исследуется верхний слой почвы глубиной 0,60 м, обработанный новым способом, который образует чередующиеся разрыхлённые области с внутрипочвенными стенками из переуплотнённой земли.

Материал и методы. Динамика почвенной влаги в разных направлениях и находящейся в различных связных и несвязных состояниях и как следствие доступность ее корням растений описываются разнообразными математическими моделями, содержащими системы дифференциальных уравнений с большим количеством эмпирических коэффициентов, точное значение которых варьирует в значительных пределах. Модели, основанные на гидродинамическом подходе и позволяющие описывать скорости и плотности водных потоков, несмотря на некоторые упрощения, обладают достаточной точностью в решении поставленной задачи влагопереноса через неоднородные структуры склонового почвенного горизонта в виде чередующихся разрыхлённых областей с внутрипочвенными стенками, полученными в результате его обработки новым способом.

Модели грунта отражают его различные состояния, а такие как глина, песок, плодородный слой почвы, торф и аналогичные им относятся к категории проницаемых сред, которые обладают сложной совокупностью твёрдых частиц непрерывной структуры, связанных между собой силами сцепления. При этом их архитектура зачастую точно не определена. Исходя из этого доскональное описание изменения динамики жидкости в толще почвы будет иметь большие затруднения. Поэтому математическую модель данных структур лучше всего представить в виде сплошной среды в каждом выделенном элементарном объёме пространства, который включает большое количество пор, обладает некоторыми осреднёнными физико-механическими характеристиками^{4, 5}.

Внутрипочвенная вода не является свободным субъектом, так как находится под воздействием сложной системы различных сил, таких как гравитационные, капиллярные,

осмотические, сорбционные. Это предполагает использование полного потенциала внутрипочвенной влаги как показателя, наиболее точно отражающего межфазные взаимодействия в почвенной среде. За идеальное состояние принимаем единичный объём, содержащий воду с нулевым осмотическим давлением, не подверженную влиянию адсорбционных и капиллярных сил, в которой отсутствуют растворённые соли, имеющую температуру T_0 , давление P_0 и определённую высоту залегания h_0 . Учитываем, что давление почвенной воды в выбранной системе координат величина отрицательная, но для его преодоления необходима работа, которая является величиной положительной.

Таким образом, движение влаги в почве происходит под действием гравитационных сил и градиента давления, обусловленного различием гидростатического напора и капиллярно-сорбционных сил в разных точках^{6, 7}.

В постановке модели динамики влагопереноса будем рассматривать дождевые осадки, выпадающие на параболический склон, обработанный новым мелиоративным способом на глубину 0,60 м – на базе глубокого рыхления. Профиль обработанного горизонта на склоне показан на рисунке 1 [8, 9].

На рисунке 2 представлены размеры зон – областей разрыхления, образующихся от стоек универсального глубокорыхлителя ГНЧ-0,6М, а также чередующихся с ними переуплотнённых промежутков – внутрипочвенных стенок [8, 9].

Результаты и их обсуждение. Динамика внутрипочвенной влаги на склоне совершается согласно законам фильтрации исходя из условия, что уровень влагонасыщения обработанного новым способом горизонта почвы не будет предельным. Учитывая это при построении модели движения внутрипочвенной влаги в склоновых обрабатываемых землях, примем следующие допущения:

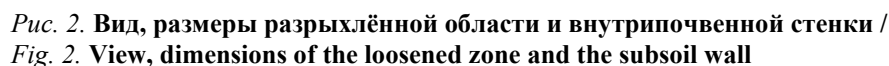
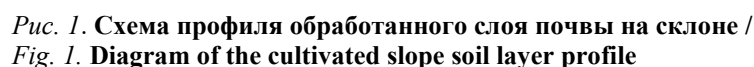
- 1) совокупность твёрдых частиц почвы непрерывной структуры, связанных между собой силами сцепления, то есть её скелет будет геометрически стабильным;
- 2) влага внутрипочвенная не сжимается;
- 3) давление воздуха внутри обработанного почвенного горизонта равно атмосферному;

⁴Леонтьев Н. Е. Основы теории фильтрации: учебное пособие. 2-е изд., исправ. М.: ООО «МАКС Пресс», 2017. 88 с.

⁵Руководство по определению коэффициента фильтрации водоносных пород методом опытной откачки. П-717-80. М.: Энергоиздат, 1981. [Электронный ресурс]. URL: <http://base1.gostedu.ru/5/5486/> (дата обращения: 28.11.2024).

⁶Гаскаров Д. В. Указ. соч.

⁷Советов Б. Я., Яковлев С. А. Указ. соч.



Исходя из вышеперечисленных допущений, для разработки математической модели динамики внутрипочвенной влаги в обрабатываемом горизонте склона применим уравнения

где вводимые переменные u , v , w – представляют скорость движения почвенной влаги относительно координатных осей x , y , z соответственно; ρ – плотность находящейся внутри почвы жидкости; g – ускорение свободного падения; $h(x, y)$ – в рассматриваемой среде верхний уровень нахождения жидкости; μ – вязкость; $\emptyset$ – в рассматриваемом пласте отношение объема пор к общему объему почвы; ∇^2 – оператор Лапласа [10, 11].

⁹URL: <http://base1.gostedu.ru/5/5486/>

Систему уравнений (1) – (3) преобразуем в векторный вид:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - g \nabla h + \frac{\mu}{\rho \phi} \nabla^2 \vec{v}, \quad (4)$$

так как при движении влаги в почве конвективные члены уравнения обычно малы и их не учитываем. Полученное уравнение представляет систему и, чтобы показать её как замкнутую, добавим уравнение состояния:

$$p = p(\theta, \rho) \quad (5)$$

и уравнение неразрывности, учитывая изменения почвенной влажности для ненасыщенной почвы. Полученное уравнение будет иметь вид:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (6)$$

где θ – объемная влажность почвы.

Гравитационные силы, влияющие на динамику внутрпочвенной влаги, представляем в виде величины gz (гравитационный потенциал). Действия капиллярных, осмотических и пленочных сил покажем, как влажностный (капиллярно-сорбционный) потенциал в виде выражения¹⁰ $\psi = \frac{p}{\rho g}$.

Преобразуем равенство (4), для этого введём величину, имеющую обозначение $\varphi = \psi + z$, затем умножив обе части равенства (4) на некоторое постоянное значение пористости ϕ , получаем, что увеличению в ϕ раз градиента φ соответствует такое же увеличение значения скорости движения влаги в почве $\vec{v}$. Исходя из выше предложенного решение уравнения (4) имеет вид:

$$u = -K_1 \frac{\partial \varphi}{\partial x}; v = -K_2 \frac{\partial \varphi}{\partial y}; w = -K_3 \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \quad (7)$$

где $K_i, i = 1, 2, 3$ - коэффициенты пропорциональности.

Представленные уравнения (7) показывают зависимость между изменением капиллярно-сорбционного потенциала и скорости фильтрации. Следовательно, оно полностью соответствует закону Дарси о фильтрации жидкостей и газов в пористых структурах, согласно его формулировке «при медленном

движении несжимаемой жидкости в неподвижной изотропной пористой среде скорость фильтрации линейно зависит от градиента давления»^{11, 12} [10, 11, 12].

Подставляя зависимости (7) в уравнение неразрывности (6), формулируем уравнение влагопереноса в почве на обработанном склоне новым мелиоративным способом на базе глубокого рыхления^{13, 14, 15, 16} [11, 12, 13]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_1 \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_2 \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_3 \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \quad (8)$$

или

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(K_1 \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_1 \frac{\partial z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_2 \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_2 \frac{\partial z}{\partial y} \right) = \\ &= \frac{\partial}{\partial z} \left(K_3 \frac{\partial \psi}{\partial z} + K_3 \frac{\partial z}{\partial z} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Во влагоненасыщенной почве влажностный потенциал ψ является функцией её влажности $\psi = \psi(\theta)$, исходя из этого, слагаемые $K_1 \frac{\partial \psi}{\partial x}, K_2 \frac{\partial \psi}{\partial y}, K_3 \frac{\partial \psi}{\partial z}$ в уравнении (9) запишем в другом виде^{17, 18, 19} [13]:

$$\begin{aligned} K_1 \frac{\partial \psi}{\partial x} &= K_1 \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial x}, K_2 \frac{\partial \psi}{\partial y} = \\ &= K_2 \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial y}, K_3 \frac{\partial \psi}{\partial z} = K_3 \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}. \end{aligned} \quad (10)$$

Величины K_i и $\frac{\partial \psi}{\partial \theta}, i = 1, 2, 3$ являются показателями свойств почвы и зависят от её влажности, и их произведение выглядит:

$$D_i = K_i \frac{\partial \psi}{\partial \theta}. \quad (11)$$

Подставим величины $D_i = K_i \frac{\partial \psi}{\partial \theta}$ в уравнение (9) и получим нелинейное уравнение диффузии в почве на обработанном склоне новым мелиоративным способом на базе глубокого рыхления. Данное уравнение примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(D_1 \frac{\partial \theta}{\partial x} + K_1 \frac{\partial z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_2 \frac{\partial \theta}{\partial y} + K_2 \frac{\partial z}{\partial y} \right) = \\ &= \frac{\partial}{\partial z} \left(D_3 \frac{\partial \theta}{\partial z} + K_3 \frac{\partial z}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (12)$$

для горизонтальных направлений: $\frac{\partial z}{\partial x} = 0$ и $\frac{\partial z}{\partial y} = 0$.

¹⁰Леонтьев Н. Е. Указ. соч.

¹¹Там же.

¹²Рекс Л. М., Кирейчева Л. В., Якиревич А. М. Методика расчета водно-солевого режима орошаемых земель. М.: ВНИИ гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова, 1984. 113 с.

¹³Рекс Л. М. Системные исследования мелиоративных процессов и систем. М.: Изд-во «Аслан», 1995. 192 с.

¹⁴Рекс Л. М., Кирейчева Л. В., Якиревич А. М. Указ. соч.

¹⁵Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге. Т. 1. Вводные свойства почв и передвижение почвенной влаги. Л.: Гидрометеиздат, 1965 г. 664 с.

¹⁶Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. С. 616.

¹⁷Роде А. А. Указ. соч.

¹⁸Роуч П. Указ. соч.

¹⁹Леонтьев Н. Е. Указ. соч.

Для вертикального направления $-\frac{\partial z}{\partial z} = 1$, уравнение (12) запишется [15, 16]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_1 \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_2 \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_3 \frac{\partial \theta}{\partial z} \pm K \right), \quad (13)$$

где $K = K(\theta) = K_3$ и называется коэффициентом влагопроводности.

В полученном уравнении (13), в последнем слагаемом его правой части знак "+" обозначает нисходящее движение внутрипочвенного влагопереноса, а знак "-" представляет движение влаги в почве по направлению вверх.

Капиллярные эффекты и сорбционные свойства слоя почвы глубиной 0,60 м на склоне учитываются величиной $D_i(\theta)$ в уравнениях диффузии влаги данного слоя (равенства (12) и (13)). При этом коэффициенты диффузии в толще рассматриваемого слоя почвы по направлениям x, y, z соответственно отражены величиной²⁰ $i = 1, 2, 3$ [10, 13, 14, 15].

В создаваемой математической модели возникает необходимость задания критериев, определяющих динамику внутрипочвенного влагопереноса в толще обработанного пласта склонового агроландшафта. Это потребовало задать водный потенциал обработанного горизонта на склоне: капиллярно-сорбционные свойства $\psi(\theta)$, диффузию $D_i(\theta)$, влагопроводность $K(\theta)$, являющиеся функциями влажности почвы. Адекватность решения задачи о динамике влагопереноса на склоне в слое почвы обработанного новым способом предполагает достаточную корректность выбора критериев движения внутрипочвенной влаги, при которых водно-физические характеристики будут отражаться моделью наиболее приемлемо. Функции $\psi(\theta)$, $D_i(\theta)$, $K(\theta)$ установим теоретически, исходя из того, что эти критерии уравнения динамики влагопереноса в почве коррелируются с главными в формулируемой математической модели водно-физическими характеристиками обработанного новым мелио-

ративным способом слоя земли глубиной 0,60 м на склоне, таким как пористость, влажность, максимальная гигроскопичность, коэффициент фильтрации и другие^{21, 22} [15, 16, 17].

Зависимость капиллярного давления от влажности почвы имеет вид:

$$\psi = -h_k^* \sqrt[3]{\frac{1}{v} \ln \frac{\theta - \theta^*}{\theta_0 - \theta^*}}, \quad \theta > \theta^*, \quad (14)$$

где h_k^* – условная высота капиллярного поднятия; θ – отношение объема влаги к объему почвы; θ_0 – отношения объема пор к общему объему почвы в исследуемом слое почвы; θ^* – связанная влага.

Покажем условие, при котором значения объемной влажности почвы больше связанной влаги – $\theta > \theta^*$, согласно этому условию, возникает интенсивное движение воды в жидкой фазе, то есть максимальная молекулярная влагоемкость (ММВ)²³ [13]. Но формула (14) не позволяет определить значения капиллярно-сорбционных свойств $\psi_0 = \psi(\theta^*)$. Гипотеза о том, что влагопроводность почвы рассматривается как функция объемного влагосодержания, а не как константа, позволяет обойти возникающее ограничение. При этом используем для построения математической модели наиболее известную полуэмпирическую модель С. Ф. Аверьянова, отражающую отношение коэффициента влагопроводности к уровню насыщения почвы влагой, представленную как степенная функция^{24, 25, 26, 27} [10, 13, 14, 15, 16]:

$$K(\theta) = K_0 \left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta_0 - \theta_0} \right)^n, \quad (15)$$

где K_0 – коэффициент фильтрации рассматриваемого слоя почвы на склоне; θ_0 – максимальная гигроскопичность; n – показатель степени для коэффициента фильтрации, может принимать различные значения в зависимости от физико-механических свойств почв.

Учтём в первом приближении, что тождественность свойств почвы грунта – это совокупность твёрдых частиц непрерывной структуры, связанных между собой²⁸.

²⁰Леонтьев Н. Е. Указ. соч.

²¹Рекс Л. М. Указ. соч.

²²Рекс Л. М., Кирейчева Л. В., Якиревич А. М. Указ. соч.

²³Леонтьев Н. Е. Указ. соч.

²⁴Рекс Л. М. Указ. соч.

²⁵Рекс Л. М., Кирейчева Л. В., Якиревич А. М. Указ. соч.

²⁶Роде А. А. Указ. соч.

²⁷Роуч П. Указ. соч.

²⁸URL: <http://base1.gostedu.ru/5/5486/>

Исходя из этого, необходимые значения, приведённые для грунтов²⁹ в таблице 1 и 2 [10, 13], используем для представления существующих пределов физико-химических явлений, при составлении частного сценария по оценке влагопереноса при проведении дальнейших экспериментальных исследований в обрабо-

танном слое склоновых земель новым способом учитываем возможные изменения форм и размеров областей разрыхления и внутрипочвенных стенок.

В таблице 2 показаны соответствующие коэффициенты фильтрации для различных типов почв (грунтов) [10, 11, 12].

Таблица 1 – Показатель степени (n) для коэффициента фильтрации почв (грунтов) /
Table 1 – Exponent for the soil (ground) filtration coefficient

Механический состав / Mechanical composition	Значение n / Value n	
	нижняя граница / lower limit	верхняя граница / upper limit
Песчаный / Sandy	3,5	4,5
Супесчаный / Sandy loam	4,0	5,0
Легкосуглинистый / Light loam	4,5	5,5
Среднесуглинистый / Semi loam	5,5	9,0
Тяжелосуглинистый и глинистый / Heavy loam and clay	6,0	12,0

Таблица 2 – Коэффициент фильтрации для различных почв (грунтов) /
Table 2 – Filtration coefficient for different soils (grounds)

Механический состав / Mechanical composition	Коэффициент фильтрации / Filtration coefficient	
	см/с / cm/s	м/сутки / m/day
Песчаный с примесью / Sandy with impurities	1,00–0,01	8,64–0,64
Песчано-глинистый / Sandy clay	0,01–0,004	8,64–3,46
Проницаемый глинистый / Permeable clay	0,004–0,001	3,46–0,86
Тяжелый глинистый / Heavy clay	<0,001	<0,86

Применим аналог формулы С. Ф. Аверьянова, которая справедлива в диапазоне от наименьшей влагоёмкости θ^* до полной влагоёмкости обработанного слоя $\bar{\theta}$:

$$K(\theta) = K_0 \left(\frac{\theta - \theta^*}{\bar{\theta} - \theta^*} \right)^m, \quad (16)$$

где показатель степени для коэффициента фильтрации $m = \frac{7}{10} n$.

В таблице 3 показаны значения максимальной молекулярной влагоёмкости (ММВ) для нескольких горизонтов почвы. Представленный слой почвы А+ является верхним гумусовым горизонтом. Слой В – переходный слой к породе, имеет, в основном, бурый окрас

с постепенной или неравномерно затечной, языковатой, ослабляющейся к низу гумусированностью. По степени гумусированности слой почвы В может подразделяться на горизонты В1 и В2. Слой С – это материнская порода^{30, 31, 32} [11, 14].

Капиллярно-сорбционные свойства почвы обрабатываемых склонов, характеризующиеся значениями: условной высотой капиллярного поднятия (h_k^*), нижним пределом иссушения почвы (максимальная гигроскопичность) (θ_0) и полной влагоёмкостью ($\bar{\theta}$) для различных типов почв, приведены в таблице 4^{33, 34, 35, 36, 37, 38}.

²⁹Леонтьев Н. Е. Указ. соч.

³⁰Рекс Л. М., Кирейчева Л. В., Якиревич А. М. Указ. соч.

³¹Роде А. А. Указ. соч.

³²URL: <http://base1.gostedu.ru/5/5486/>

³³Почвоведение: учебник для ун-тов. В 2 ч. Под ред. В. А. Ковды, Б. Г. Розанова. Ч. 1. Почва и почвообразование. Г. Д. Белицина, В. Д. Васильевская, Л. А. Гришина [и др.]. М.: Высшая школа, 1988. 400 с.

³⁴Рекс Л. М. Указ. соч.

³⁵Рекс Л. М., Кирейчева Л. В., Якиревич А. М. Указ. соч.

³⁶Роде А. А. Указ. соч.

³⁷Роуч П. Указ. соч.

³⁸URL: <http://base1.gostedu.ru/5/5486/>

Таблица 3 – Значения максимальной молекулярной влагоемкости (ММВ) в слоях почвы /
Table 3 – Values of maximum molecular moisture capacity (MaxMMC) in soil layers

Слой почвы / Soil layer	Наименьшая влагоемкость (НВ), % / Minimum moisture capacity (MinMC), %	ММВ, % от НВ / MaxMMC, % of MinMC
A+, B	23,1	63,2
B1	19,6	61,0
B2	18,4	62,0
C	18,6	59,7

Таблица 4 – Величины, характеризующие капиллярные и сорбционные свойства почвы /
Table 4 – Values characterizing the soil capillary and absorption properties

Механический состав / Mechanical composition	$\bar{\theta}$, %	θ_0 , %	h_k^* , м
Песчаный / Sandy	0,37–0,40	0,05–0,10	0,5–1,2
Супесчаный / Sandy loam	0,40–0,44	0,08–0,13	0,7–1,5
Легкосуглинистый / Light loam	0,44–0,48	0,10–0,15	1,5–2,5
Среднесуглинистый / Semi loam	0,40–0,44	0,13–0,18	2,5–3,5
Тяжелосуглинистый и глинистый / Heavy loam and clay	0,43–0,49	0,16–0,25	4,0–7,0

Примечания: $\bar{\theta}$ – максимальная гигроскопичность, θ_0 – полная влагоемкость, h_k^* – условная высота капиллярного поднятия жидкости /

Notes: $\bar{\theta}$ – maximum hygroscopicity, θ_0 – full moisture capacity, h_k^* – the conditional height of the capillary rise of the liquid

Приравнивая формулы (15) и (16), окончательно получим максимальную молекулярную влагоемкость:

$$\theta^* = \frac{\bar{\theta}(\bar{\theta}-\theta_0)^{\frac{10}{7}} - \bar{\theta}(\bar{\theta}-\theta_0)^{\frac{10}{7}}}{(\bar{\theta}-\theta_0)^{\frac{10}{7}} - (\bar{\theta}-\theta_0)^{\frac{10}{7}}}. \quad (17)$$

Формула (17) отражает основную гидрофизическую характеристику, представляющую зависимость капиллярного давления от влажности разрыхленного слоя почвы на склоне (14), что позволяет находить капиллярное давление в разных условиях, включая ММВ по зависимости:

$$\psi = -h_k^* \sqrt[3]{\frac{10}{7v} \ln \frac{\theta - \theta_0}{m - \theta_0}}, \theta \geq \theta^*. \quad (18)$$

Для нахождения взаимного влияния коэффициентов диффузии от влажности почвы лучше всего использовать уравнения влагопереноса, в которых определяются коэффициенты диффузии и влагопроводности. Это соответствует, так называемой, обратной задаче, которая позволяет определить параметры влагопереноса в почве с помощью двумерной математической модели нестационарного влагопереноса в почвенных горизонтах. Однако теоретическое определение этих коэффици-

ентов весьма затруднительно. В этом случае для нахождения гидрофизических характеристик используются значения, полученные эмпирическим путём, что позволяет решать задачи такого типа³⁹ [14, 15].

Одно из решений подобных задач возможно при использовании модели пористой среды, выбор которой определяется частной задачей. Для решения задачи влагопереноса через внутрисочвенную стенку наилучший результат даёт метод Дж. Гарднера, устанавливающий экспоненциальный характер зависимости коэффициента диффузии от влажности:

$$D_i(\theta) = D_0 \exp[\beta(\theta - \theta^*)], \quad (19)$$

где β – критерий, учитывающий вид среды, в нашем случае почвы как пористой среды; D_0 – коэффициент диффузии при начальной влажности $\theta = \theta^{*40, 41}$ [11, 12, 14, 16].

В таблице 5 представлены, в зависимости от направления влагопереноса, значения коэффициента диффузии D_0 и значения β при различной начальной влажности почвы. Влажность показана в долях от наименьшей влагоемкости (НВ)^{42, 43} [12, 14, 16, 17].

³⁹Почвоведение. М., 1988.

⁴⁰Леонтьев Н. Е. Указ. соч.

⁴¹Рекс Л. М., Кирейчева Л. В., Якиревич А. М. Указ. соч.

⁴²Леонтьев Н. Е. Указ. соч.

⁴³Рекс Л. М., Кирейчева Л. В., Якиревич А. М. Указ. соч.

Таблица 5 – Значения коэффициентов диффузии от влажности почвы в зависимости от направления влагопереноса /

Table 5 – Values of diffusion coefficients to soil moisture in dependence of the moisture movement direction

Направление движения влаги / Moisture movement direction	Горизонтальное / Horizontal		Вверх вертикально / Vertically upwards		Вниз вертикально / Vertically downwards	
Начальная влажность / Initial moisture	D_0	β	D_0	β	D_0	β
65 % HB / MinMC	0,000126	57,118	0,001959	33,258	0,006281	39,409
75 % HB / MinMC	0,005266	39,86	0,01	27,674	0,009198	29,701
85 % HB / MinMC	0,047	31,073	0,047	23,145	0,042	24,854

Примечания: D_0 – коэффициент диффузии, β – вид среды /

Notes: D_0 – diffusion coefficient, β – type of environment

Следующим этапом для построения модели влагопереноса является установление начальных и краевых (граничных) критериев для обработанного пласта почвы на склоне, структурными составляющими которого являются чередующиеся разрыхленные области и внутрипочвенные стенки. При этом они имеют резко отличающиеся друг от друга водно-физические характеристики. В связи с этим, в качестве начального критерия устанавливаем исходное распределение влаги. Следовательно, максимальная гигроскопичность запишется [15, 16]:

$$\theta_0 = \theta(x, y, z, 0) = \theta^*. \quad (20)$$

Далее установим краевой критерий на границе почвы и воздуха, определяющий причину увлажнения почвы на склоне:

$$I = -K \left. \frac{\partial \theta}{\partial z} \right|_{z=z'} = - \left(D_3(\theta) \left. \frac{\partial \theta}{\partial z} \right|_{z=z'} + K(\theta) \right), \quad (21)$$

при $z = z'$; где I – мощность выпадающих дождей; $z' = z'(x, y)$ – функция, описывающая параметры обработанного склона (уклон, протяжённость) с внутрипочвенными стенками [14, 15].

Затем определяется зависимость объёмной влажности почвы к связанной влаге в окрестности нижней границы расчётной зоны обработанного пласта. Для нашего случая принимаем [15, 16]:

$$\theta = \theta^* \text{ при } z = z' - H, \quad (22)$$

где H – глубина исследуемой расчётной зоны увлажнения (толщина обработанного горизонта на склоне).

Завершающим этапом в разработанной модели движения влагопереноса на обработанном новым способом склоне является установление условия свободного протекания через расчётную зону, принимая её как пористое тело. Исходя из этого на боковых границах этой зоны установим:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \bar{n}} = 0, \quad (23)$$

где $\bar{n}$ – просветность^{44, 45, 46} [15, 16].

При составлении компьютерной программы для решения математической модели динамики влагопереноса (8)...(23) используем программный комплекс FlexPDE, который предназначен для построения сценарных моделей решения заданных дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов и представления результатов в графической форме.

На рисунке 3 показана блок-схема решения краевой задачи динамики внутрипочвенного влагопереноса на обработанном новым способом склоне. При необходимости представленный сценарий редактируем, затем цикл расчёта снова запускается и так до тех пор, пока результат не удовлетворит всем заданным требованиям.

Заключение. Разработана математическая модель внутрипочвенного влагопереноса на склоне, обработанном новым мелиоративным способом, направленным на внутрипочвенное влагоудержание. В ней исследуется обработанный верхний слой почвы глубиной 0,60 м с устройством внутрипочвенных стенок на базе глубокого рыхления.

⁴⁴Леонтьев Н. Е. Указ. соч.

⁴⁵Рекс Л. М., Кирейчева Л. В., Якиревич А. М. Указ. соч.

⁴⁶Роуч П. Указ. соч.

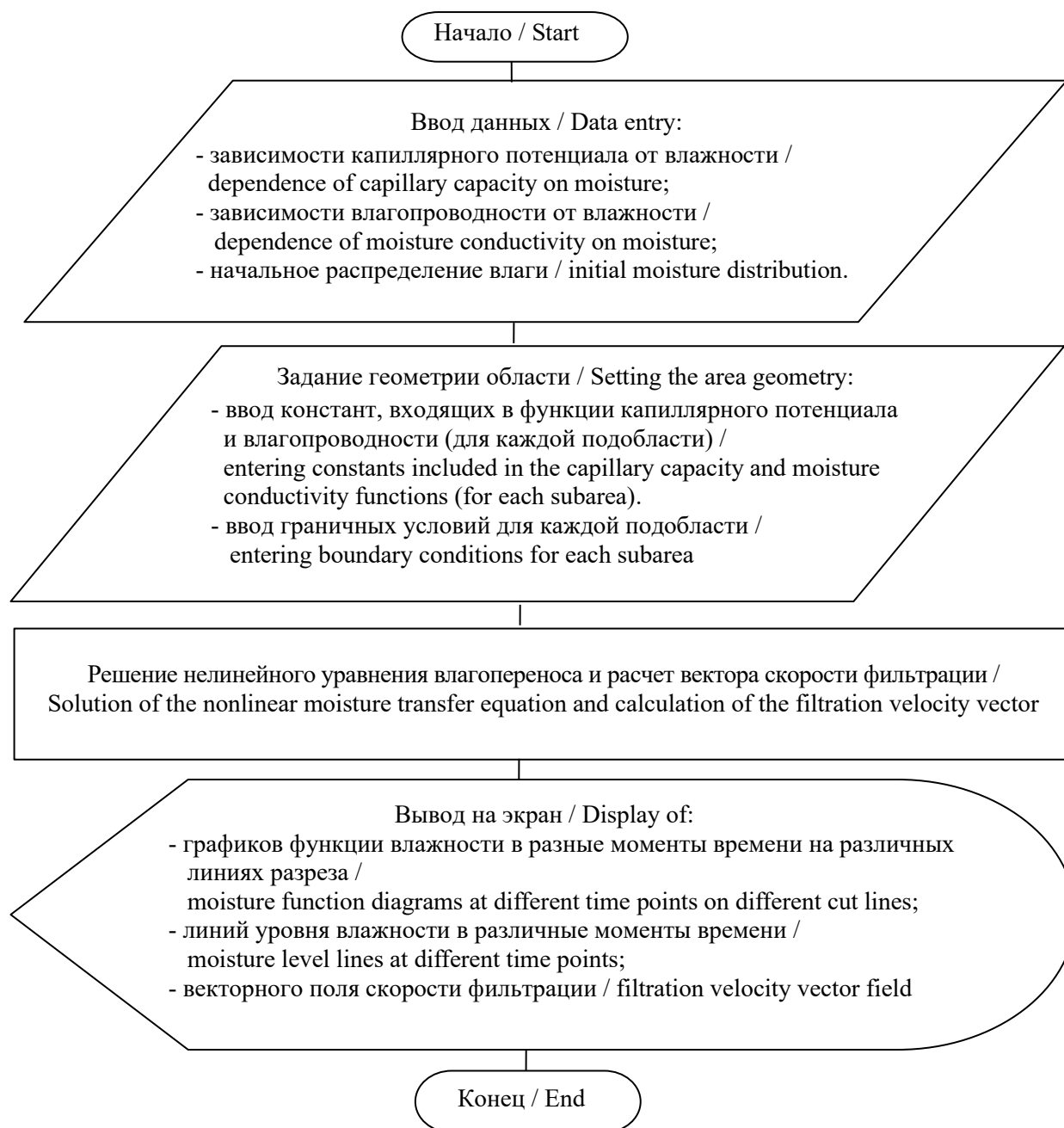


Рис. 3. Блок-схема решения краевой задачи динамики внутрипочвенного влагопереноса /
Fig. 3. A flowchart for solving the boundary value problem of the dynamics of subsoil moisture transfer

Данная модель разработана на базе уравнения Навье-Стокса для движения воды в пористой среде, учитывающая зависимость между изменением капиллярно-сорбционного потенциала и скорости фильтрации. Модель позволяет определять параметры динамики влагопереноса такого обработанного слоя: коэффициенты диффузивности, влагопроводности и капиллярно-сорбционного потенциала. Установлены граничные и начальные условия:

начальное распределение влаги, краевое условие на границе почвы и воздуха. На основе полученной модели разработана программа для решения краевой задачи динамики внутрипочвенного влагопереноса на обработанном новом способе склоне, учитывая неоднородные структуры склонового почвенного горизонта в виде чередующихся разрыхлённых областей с внутрипочвенными стенками.

Список литературы

1. Максимов В. П., Михайлин А. А. Создание универсального орудия для мелиоративной обработки равнин и склонов на основе концептуального конструирования. *Аграрный научный журнал*. 2024;(3):110–117. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i3pp110-117> EDN: CIEJUJ
2. Максимов В. П., Михайлин А. А. Анализ функциональных требований к системе мелиоративной обработки склоновых и равнинных земель. *Аграрный научный журнал*. 2024;(7):117–124. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i7pp117-124> EDN: MGISPQ
3. Щедрин В. Н., Масный Р. С., Манжина С. А., Куприянова С. В. Стратегический подход к развитию мелиорации в условиях меняющегося климата. *Мелиорация и водное хозяйство*. 2022;(2):11–17. DOI: <https://doi.org/10.32962/0235-2524-2022-2-11-18> EDN: KVGWSI
4. Пындак В. И., Новиков А. Е. Обоснование рабочих органов для глубокого рыхления почвы при возделывании ширококормных пропашных культур в условиях орошения. *Известия Нижневолжского агро-университетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2012;(2):161–165. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17773645> EDN: NMBFJO
5. Полуэктов Е. В., Сухомлинова Н. Б. Анализ эффективности почвозащитных приемов и мероприятий по их стокорегулирующей способности. *Мелиорация и гидротехника*. 2022;12(1):99–118. DOI: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-1-99-118> EDN: BSVHQT
6. Михайлин А. А. Универсальный глубокорыхлитель навесной чизельный: пат. № 2694571 Российская Федерация. № 201714056: заявл. 21.11.2017; опубл. 21.05.2019. Бюл. № 15. 5 с. Режим доступа: https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
7. Михайлин А. А. Способ обработки склоновых почв: пат. № 2255450 Российская Федерация. № 2002108073/12: заявл. 29.03.2002; опубл. 10.07.2005. Бюл. №19. 5 с. Режим доступа: https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
8. Михайлин А. А. Постановка математической модели устойчивости обработанного пласта почвы на склоне. *Природообустройство*. 2009;(2):92–94. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12924471> EDN: KWVMKJ
9. Михайлин А. А. Анализ устойчивости обрабатываемых влагонасыщенных склоновых почв. *Инженерный вестник Дона*. 2012;(4-1(22)):38. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18640036> EDN: PRXKEP
10. Кучмент Л. С. Модели процессов формирования речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 144 с.
11. Вабищевич П. Н., Данияров А. О. Математическое моделирование промачивания зоны аэрации в условиях близкого залегания грунтовых вод. *Математическое моделирование*. 1994;6(11):11–23. Режим доступа: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=mm&paperid=1925&option_lang=rus
12. Вабищевич П. Н., Данияров А. О., Пулатов П. А. Численное моделирование увлажнения грунта. *Математическое моделирование*. 1991;3(6):3–9. Режим доступа: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=mm&paperid=2234&option_lang=rus
13. Рекс Л. М., Якиревич А. М., Файбишенко Б. А. Моделирование процесса формирования водно-солевого режима орошаемых почв. *Мелиорация и водное хозяйство*. 1990;(6):16–19.
14. Ахмедов А. Д. Аналитический подход к определению некоторых водно-физических характеристик почвогрунтов. Роль мелиорации и водного хозяйства в реализации национальных проектов: мат-лы между-народ. научн.-практ. конф. М.: Московский государственный университет природообустройства, 2008. Ч. 1. С. 21–27.
15. Боровой Е. П., Ветренко Е. А. Аналитический подход к определению параметров контура увлажнения почвы на основе решения уравнения влагопереноса. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2009;(4(16)):52–57. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12982653> EDN: KYCPCB
16. Бузало Н. С., Захарченко Н. С. Математическое моделирование динамики влагопереноса в обрабатываемом слое почвы. *Новая наука: от идеи к результату*. 2017;(3-2):185–187. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28826469> EDN: YGVVBL
17. Guo Y., Wang Q., Liu Ya., Zhang J., Wei K. Water and salt transport characteristics in a soil column in the presence of a low-permeable body. *Canadian Journal of Soil Science*. 2022;102(4):991–999. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjss-2022-0061>

References

1. Maksimov V. P., Mikhaylin A. A. Creation of a universal tool for reclamation cultivation of plains and slopes based on conceptual design. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2024;(3):110–117. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i3pp110-117>
2. Maksimov V. P., Mikhaylin A. A. Analysis of functional requirements for the system of reclamation treatment of slopes and plains lands. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2024;(7):117–124. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i7pp117-124>

3. Shchedrin V. N., Masnyy R. S., Manzhina S. A., Kupriyanova S. V. Strategic approach to development of reclamation in a changing climate. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* = Melioration and Water Management. 2022;(2):11–17. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32962/0235-2524-2022-2-11-18>
4. Pyndak V. I., Novikov A. E. Justification of working bodies for deep loosening of the soil during cultivation of wide-row crops under irrigation conditions. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* = Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education. 2012;(2):161–165. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17773645>
5. Poluektov E. V., Sukhomlinova N. B. Analysis of the efficiency of soil conservation practices and measures for their flow-regulating ability. *Melioratsiya i gidrotekhnika* = Land Reclamation and Hydraulic Engineering. 2022;12(1):99–118. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-1-99-118>
6. Mikhaylin A. A. Universal mounted chisel deep tiller: patent RF, no. 2694571. 2019. URL: https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
7. Mikhaylin A. A. The method of cultivating sloping soils: patent RF, no. 2255450. 2005. URL: https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
8. Mikhaylin A. A. Statement of the mathematical model of the strength of the cultivated soil layer on the slope. *Prirodobustroystvo*. 2009;(2):92–94. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12924471>
9. Mikhaylin A. A. Stability analysis of slope cultivated wetland soils. *Inzhenernyy vestnik Dona* = Engineering Journal of Don. 2012;(4-1(22)):38. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18640036>
10. Kuchment L. S. Models of river flow formation processes. Leningrad: *Gidrometeoizdat*, 1980. 144 p.
11. Vabishchevich P. N., Daniyarov A. O. Mathematical modelling of wetting of the aeration zone in conditions of the nearly bedding subsoil waters. *Matematicheskoe modelirovanie*. 1994;6(11):11–23. (In Russ.). URL: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=mm&paperid=1925&option_lang=rus
12. Vabishchevich P. N., Daniyarov A. O., Pulatov P. A. Numerical modelling of ground moistening. *Matematicheskoe modelirovanie*. 1991;3(6):3–9. (In Russ.). URL: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=mm&paperid=2234&option_lang=rus
13. Reks L. M., Yakirevich A. M., Faybisenko B. A. Modeling of the formation of the water-salt regime of irrigated soils. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* = Melioration and Water Management. 1990;(6):16–19. (In Russ.).
14. Akhmedov A. D. An analytical approach to the determination of some water-physical characteristics of soils. The role of land reclamation and water management in the implementation of national projects: Proceedings of the international scientific and practical conference. Moscow: *Moskovskiy gosudarstvennyy universitet prirodobustroystva*, 2008. Part. 1. pp. 21–27.
15. Borovoy E. P., Vetenko E. A. Analytical approach to soil moistening contour parameters determination based on moisture transportation equation solution. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* = Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education. 2009;(4(16)):52–57. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12982653>
16. Buzalo N. S., Zakharchenko N. S. Mathematical modeling of the dynamics of moisture transfer in the cultivated soil layer. *Novaya nauka: ot idei k rezul'tatu*. 2017;(3-2):185–187. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28826469>
17. Guo Y., Wang Q., Liu Ya., Zhang J., Wei K. Water and salt transport characteristics in a soil column in the presence of a low-permeable body. *Canadian Journal of Soil Science*. 2022;102(4):991–999. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjss-2022-0061>

Сведения об авторе

✉ **Михайлин Андрей Андреевич**, кандидат техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова», ул. Просвещения, д. 132, г. Новочеркасск, Ростовская обл., Российская Федерация, 346428, e-mail: rektorat@npi-tu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7952-5699>, e-mail: mih_2005@rambler.ru

Information about the author

✉ **Andrey A. Mikhaylin**, PhD in Engineering, associate professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132, Prosveshcheniya str., Novocherkassk, Rostov Region, Russian Federation, 346428, e-mail: rektorat@npi-tu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7952-5699>, e-mail: mih_2005@rambler.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author