



Моделирование влияния удобрений на динамику контуров увлажнения при капельном орошении

И. А. Успенский¹, И. В. Фадеев^{2*}, В. В. Алексеев³,
В. П. Филиппов³

¹ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева» (г. Рязань, Российская Федерация)

²ФГБОУ ВО «Чувашский государственный педагогический университет имени И. Я. Яковлева» (г. Чебоксары, Российская Федерация)

³ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова» (г. Чебоксары, Российская Федерация)

*ivan-fadeev-2012@mail.ru

Введение. Обзор исследований по моделированию и расчету контуров увлажнения показывает, что на данном этапе уже достаточно хорошо формализован математический аппарат, связывающий физические обоснованные параметры и гидрофизические свойства почв. Однако для повышения эффективности капельного орошения и фертигации необходимо определить влияние растворенных в поливной воде удобрений на гидрофизические свойства почв. С помощью учета этих характеристик важно определить степень воздействия удобрений на развитие формы и размеров контуров увлажнения.

Материалы и методы. Для исследования влияния удобрений на динамику контуров увлажнения использовался монофосфат калия, поскольку он имеет «плохую» подвижность в почве и его выгодно вносить с поливной водой. Внесение монофосфата калия оказывает влияние на плотность, вязкость, осмотическое давление, контактный угол смачивания и поверхностное натяжение поливной воды. В результате наблюдается изменение основной гидрофизической характеристики почвы и ее функции влагопроводности. Поэтому и контуры увлажнения формируются с небольшими, но все же заметными отличиями.

Результаты исследования. Разработано программное средство, позволяющее исследовать динамику контуров увлажнения различных типов почв механического состава с разной пористостью и с заранее известным начальным распределением влаги по глубине.

Обсуждение и заключение. При добавлении в воду монофосфата калия или других питательных веществ наблюдаются небольшие изменения при формировании контуров увлажнения. Полученные результаты позволяют на стадии проектирования процесса внесения удобрений с поливной водой в капельном орошении для различных вариантов концентрации рассчитать поливные нормы.

Ключевые слова: фертигация, контур увлажнения, функция влагопроводности, численные методы, математическая модель

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Успенский И. А., Фадеев И. В., Алексеев В. В., Филиппов В. П., 2021



Для цитирования: Моделирование влияния удобрений на динамику контуров увлажнения при капельном орошении / И. А. Успенский, И. В. Fadeev, В. В. Алексеев, В. П. Филиппов. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202101.097-108](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.097-108) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 1. – С. 97–108.

Original article

Modeling the Effect of Fertilizers on the Dynamics of Moisture Contours at Drip Irrigation

I. A. Uspensky^a, I. V. Fadeev^{b*}, V. V. Alekseev^c, V. P. Philippov^c

^aRyazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev (Ryazan, Russian Federation)

^bChuvash I. Yakovlev State Pedagogical University (Cheboksary, Russian Federation)

^cChuvash I. N. Ulyanov State University (Cheboksary, Russian Federation)

*ivan-fadeev-2012@mail.ru

Introduction. A review of research on modeling and calculating moisture contours shows that at this stage there is a developed formalized mathematical apparatus connecting physically reasonable parameters and hydro-physical properties of soils. However, to improve the efficiency of drip irrigation and fertigation, it is necessary to determine the effect of fertilizers dissolved in irrigation water on hydrophysic properties of soil, and on the basis of the findings to determine the effect of fertilizers on shapes and sizes of moisture contours.

Materials and Methods. To investigate the effect of fertilizers on the dynamics of moisture contours, potassium monophosphate was used, because it has a “bad” mobility in soil and it is cost-efficient to be introduced into irrigation water. Potassium monophosphate effects on density, viscosity, osmotic pressure, moisture contact angle and surface tension of irrigation water. As a result, there are changes in soil water retention curve and its hydraulic conductivity function. Therefore, moisture contours are formed with small, but still significant differences.

Results. A software tool has been developed that allows exploring the dynamics of the moisture contours of different soil types and texture with different porosity and with a previously known moisture distribution in depth.

Discussion and Conclusion. When potassium monophosphate or other nutrients are added to water, small changes of the formation of moisture contours are observed. The results obtained enable us to calculate irrigation norms at the design stage of the planning process of fertilizer distribution with irrigation water during drip irrigation for different concentrations.

Keywords: fertigation, moisture contour, moisture conductivity function, numerical methods, mathematical model

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Uspensky I.A., Fadeev I.V., Alekseev V.V., et al. Modeling the Effect of Fertilizers on the Dynamics of Moisture Contours at Drip Irrigation. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(1):97-108. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.097-108>

Введение

Внесение удобрений с поливной водой (фертигация) получило широкое распространение в отечественном агропромышленном комплексе почти

одновременно с капельным орошением. Бурный рост популярности данного метода подачи растворенных питательных веществ в поливной воде неслучаен. Фертигация практически

всегда дает возможность одновременного решения широкого круга задач, связанных с обеспечением растений минеральными веществами. В настоящее время разработано достаточно большое число устройств (насосов, инжекторов и др.), обеспечивающих полив и питание растений. Основными известными преимуществами реализации таких устройств являются: экологичность и минимизация затрат на удобрения вследствие возможности локализовать область их внесения в соответствии с особенностями строения корневой системы; высокая степень точности контроля концентрации вносимых удобрений и времени внесения, оперативно и согласно биологическим фазам роста растений.

При высокой степени практического использования фертигации в агропромышленном комплексе остается немало задач, требующих внимания и решения: пространственная неоднородность распределения питательных веществ может приводить к их избыточной концентрации в тех областях, где в них нет острой необходимости, и, наоборот, к пониженной концентрации в областях с дефицитом питательных веществ; периодичность и объемы подачи растворенных удобрений определяют динамику концентраций элементов питания в корнеобитаемой зоне. Решение данных задач позволит оптимизировать процесс орошения в разрезе создания благоприятных условий роста и развития растений и автоматизировать его на более высоком уровне.

Целью исследования является определение влияния растворенных в поливной воде удобрений на развитие формы и размеров контуров увлажнения при капельном орошении. Для реализации задачи разработано программное средство, позволяющее исследовать динамику контуров увлажнения некоторых

видов почв при различных пористостях и с заранее известным начальным распределением влаги по глубине.

Обзор литературы

Теоретические и прикладные вопросы капельного орошения широко освещены в научных исследованиях. Подбор поливных норм для создания благоприятного водного режима на основе обработки статистического материала показан в ряде работ [1; 2]. Рост и развитие сельскохозяйственных растений изучен в разрезе позиций точного земледелия [3–5]. Представлены различные типы посадки корнеклубнеплодов и орошения в корреляции с изменениями влажности почв, норм полива и влияния на урожайность [6]. Проблемам моделирования параметров контуров капельного увлажнения и комбинированного орошения почв посвящены исследования, в которых изучено, как начальная влажность почвы и объем поданной воды влияют на геометрические параметры контуров, показаны значения величин влажности, являющиеся наиболее благоприятными для роста культурных растений [7; 8]. Приведено решение проблемы эффективного внесения мелиорантов [9; 10].

В работе В. В. Бородычева предложена концепция, дающая возможность определения времени поливов и составления их планов [11]. Л. В. Кирейчева и соавторы изучили влияние подачи воды в течение суток на основе автоматизации контроля и корректировки подачи [12]. Эффективность мелиоративных мероприятий оценена на основе теории рисков [13].

Коэффициенты влагопроводности при влажности, близкой к полной влагоемкости (методом монолитов), определялись в другой работе, особенностью которой является учет влияния трещин на перемещение воды в почве [14]. Определены значения влажностей, при которых почвенные трещины остаются

частично открытыми даже при относительно высоком насыщении почвы водой. Для определения коэффициентов влагопроводности и фильтрации предложено использовать почвенные колонны и лизиметры [15]. Изучено влияние ряда почвенных и водных свойств на формирование контуров при капельном орошении [16]. На основе законов физики и математической статистики получены различного рода модели для определения геометрических характеристик контуров. Описаны почвенные характеристики, учет которых обязателен при изучении и прогнозировании формирования контуров увлажнения. Ими оказались такие общеизвестные величины, как сорптивность, наименьшая влагоемкость и механический состав почв.

Резюмируя краткий обзор исследований по обозначенной тематике, можно отметить, что на данном этапе изыскания уже содержат хорошо формализованный математический аппарат, связывающий физически обоснованные параметры и гидрофизические свойства почв. Однако анализ также показал, что для повышения эффективности капельного орошения и фертигации необходимо определить влияние растворенных в поливной воде удобрений на гидрофизические свойства почв, а также на развитие формы и размеров контуров увлажнения.

Материалы и методы

Для исследования влияния удобрений на динамику контуров увлажнения при капельном орошении использовался монофосфат калия (данное удобрение широко распространено и известно большинству сельхозтоваропроизводителей). Он часто используется для подкормки растений, поскольку позволяет за небольшой промежуток времени улучшить качество грунта. Основными составляющими данного удобрения являются фосфор (от 25 до 50 %) и калий (от 25 до 35 %). Поскольку именно эти

элементы питания имеют «плохую» подвижность в почве, их выгодно вносить с поливной водой.

Монофосфат калия хорошо растворим в воде. Вносить его необходимо только в хорошо увлажненную почву после обильного полива. Дозировка для культур различна, но в среднем варьируется от 5 до 30 г на 10 л воды. Внесение монофосфата калия оказывает влияние на некоторые свойства воды. На проценты и доли процента повышается плотность, вязкость, осмотическое давление, контактный угол смачивания. На десятки процентов снижается коэффициент поверхностного натяжения. Перечисленные величины легко и быстро измеримы классическими физическими методами. Для определения изменения контактного угла смачивания разработана методика и программное средство, автоматизирующее процесс вычислений [17; 18]. Результатом совокупного изменения перечисленных величин является изменение основной гидрофизической характеристики почвы (ОГХ) и функции влагопроводности. Функция влагопроводности в данной работе рассматривается как зависимость коэффициента влагопроводности от потенциала почвенной влаги и как зависимость коэффициента влагопроводности от почвенной влажности. Естественно, что при изменении этих характеристик меняется объем влаги, перетекающей от одной рассматриваемой точки к другой, поэтому и контуры увлажнения формируются с небольшими, но все же заметными отличиями. Для построения ОГХ и функции влагопроводности используются формулы (1) и (2), полученные в другой работе [19]. Функция влагопроводности показывает, каким образом под действием градиента давления будет перемещаться влага по почве. Величина давления почвенной влаги

(или эквивалентного ему потенциала), в зависимости от влагосодержания и, соответственно, возникающих в почве градиентов, определяется ОГХ. Поэтому для целей мелиорации интерес представляет именно совместное использование ОГХ и функции влагопроводности.

Формула для ОГХ, зависимость потенциала влаги ψ от объемной влажности w , может быть записана в виде [19]:

$$\psi = \psi' + \psi'' = \frac{A\Omega_0^3}{\rho w^3} + \frac{\Omega_0\sigma_{lg}}{\rho} \cdot D(w, \Pi_0), \quad (1)$$

где Ω_0 – объемная удельная поверхность; w – объемная влажность; σ_{lg} – коэффициент поверхностного натяжения (вода – воздух); ρ – плотность воды; A – постоянная; $D(w, \Pi_0)$ – функция, учитывающая гранулометрический состав.

Коэффициент влагопроводности отличается от коэффициента фильтрации тем, что позволяет описывать передвижение влаги в неполностью насыщенных водой почвах. Для него можно записать формулу [19; 20]:

$$K = K_f(\Omega_0, \eta, \Pi_0) \cdot \frac{\lambda \Pi_0^+}{1 - \Pi_0} \left[1 - \left(1 - \frac{w}{\Pi_0} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где $K_f(\Omega_0, \eta, \Pi_0)$ – коэффициент фильтрации; η – вязкость воды; λ, α – коэффициенты.

В случае добавления монофосфата калия в формуле (1) появляется дополнительное слагаемое ψ''' , определяющее по закону Вант-Гоффа осмотическое давление:

$$p = CRT, \quad (3)$$

или эквивалентный ему потенциал:

$$\psi''' = CRT / \rho, \quad (4)$$

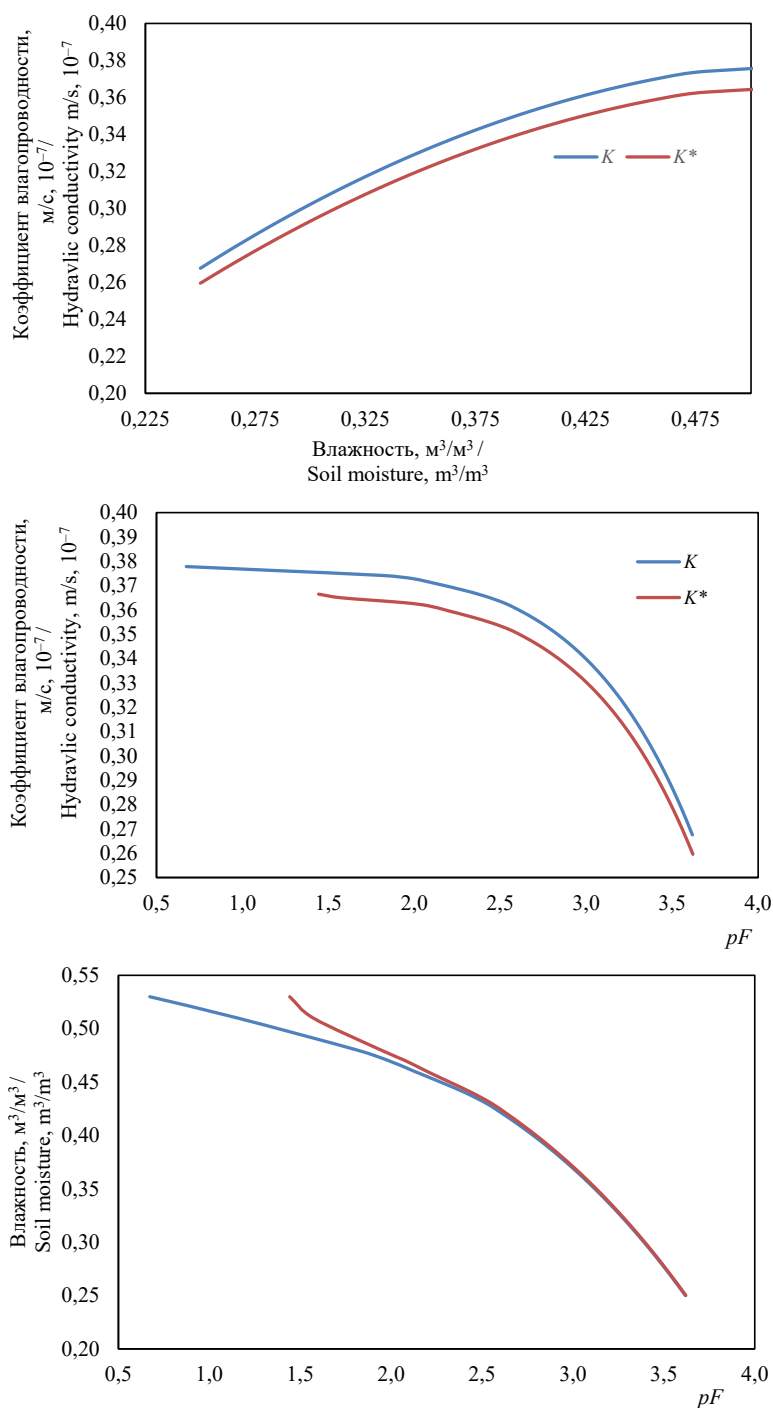
где C – концентрация (молярная); R – универсальная газовая постоянная; T – температура; ρ – плотность воды.

В работе будем придерживаться общепринятых обозначений для потенциала почвенной влаги. Исторически сложилось так, что потенциал почвенной влаги принято выражать десятичным логарифмом давления, выраженным в сантиметрах водного столба (pF). На верхних двух графиках рисунка 1 показано изменение функции влагопроводности светло-серой лесной почвы (от влажности и от потенциала), а на нижнем – основной гидрофизической характеристики почвы при добавлении монофосфата калия (из расчета 30 г на 10 л). На рисунке 1 K соответствует чистой воде, а K^* соответствует воде с монофосфатом калия. Масштабы осей подобраны таким образом, чтобы относительно небольшие изменения функций сделать заметными.

Расчеты показывают, что при изменении значений объемной влажности от 0,44 до 0,54 (соответствует в данном случае полному заполнению пор водой) коэффициент влагопроводности в среднем изменился на 3,1 %, а потенциал почвенной влаги от 2,2 до 114,6 %. Для реализации цели исследования нами разработано программное средство, позволяющее исследовать динамику контуров увлажнения нескольких видов почв при различных пористостях и с заранее известным начальным распределением влаги по глубине.

Результаты исследования

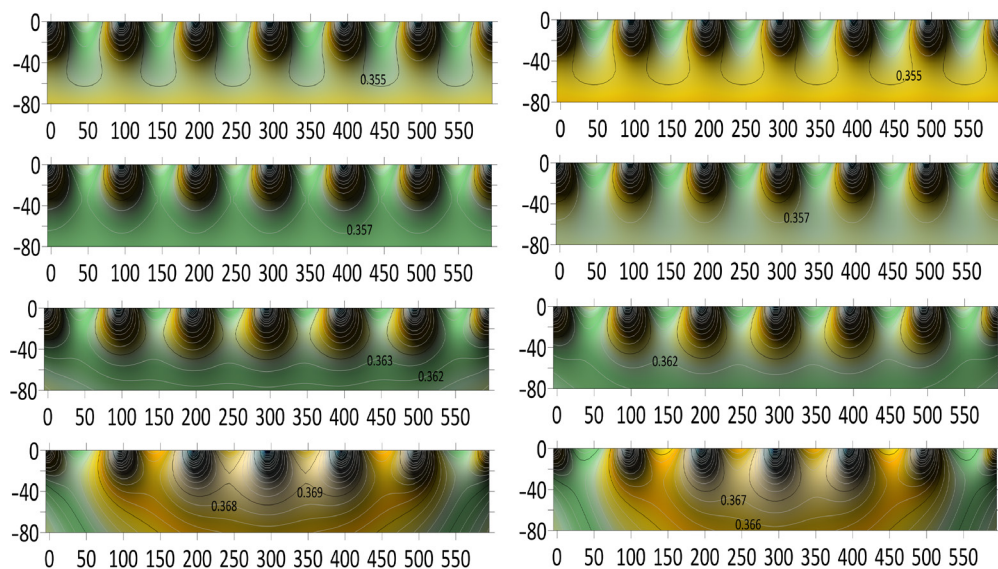
При изучении влияния монофосфата калия на динамику контуров увлажнения в данной работе имелись следующие начальные условия. Пористость почвы практически линейно уменьшалась от 0,60 на поверхности до 0,49 на глубине 0,80 м. Удельная поверхность, наоборот, с глубиной показательно возрастала от 40 до 46 м²/г. При таких параметрах серой лесной почвы наименьшей



Р и с. 1. Изменение водно-физических характеристик под влиянием монофосфата калия
 F i g. 1. Change in water-physical characteristics under the influence of potassium monophosphate

влажностности (НВ) соответствует объемная влажность 0,545, то есть значению объемной влажности 0,37 соответствует общепринятое 0,679 НВ. Расчет был сделан из условий, что на каждую точку подавалось 80 л воды с интенсивностью 4 л в час, то есть в течение 20 часов. Проведенные нами ранее исследования по изучению адекватности моделирования капельного орошения на склоновых землях чистой водой показали хороший уровень соответствия результатов моделирования экспериментальным данным [21]. В зависимости от величины уклона это соответствие, рассчитанное по величине коэффициента детерминации, составило $R^2 = 0,60 \div 0,79$ для нулевого уклона и $R^2 = 0,64 \div 0,78$ для уклона в 11° . В данном случае обработанные значения результатов экспериментов не дают возможности утверждать, что расхождения в динамике контуров увлажнения для случаев с чистой водой и водой, содержащей монофосфат калия, статистически значимы. Значи-

мость расхождения между теоретическими и экспериментальными данными определялась с помощью критерия Пирсона χ^2 . Гипотеза о том, что существует разница между контурами увлажнения чистой водой и водой, содержащей монофосфат калия, статистически не подтверждается (частоты хорошо согласуются, и вероятность получить значение критерия χ^2 больше критического χ^2_k при данных условиях равна 67,4 %). Однако расхождения имеют место, и результаты моделирования это демонстрируют (см. рисунок 2: по осям линейные размеры в метрах, шаг между изолиниями 0,002 НВ). Форма контуров и их смыкание влияют на формирование корневой системы и на содержание питательных веществ, которые после высыхания концентрируются именно в областях границы контура увлажнения. На рисунке 2 можно наблюдать отличие в местах смыкания контуров для чистой воды и воды, содержащей удобрение. При наличии в поливной



Р и с. 2. Сравнение развития контуров увлажнения при капельном орошении чистой водой (слева) и водой, содержащей монофосфат калия, (справа)

Fig. 2. Comparison of the development of moisture contours during drip irrigation with clean water (left) and water containing potassium monophosphate (right)

воде монофосфата калия смыкание идет «медленнее». Это значит, что для достижения эффекта смыкания контуров потребуется большее количество поливной воды.

Обсуждение и заключение

В зависимости от содержания влаги в почве ее физико-механические свойства и доступность влаги растениям существенно различаются. Свойства почвы описываются различными реологическими моделями. Переход от одной модели к другой при этом часто обуславливается небольшими изменениями значений влажности почвы. Эти изменения могут быть спрогнозированы осуществленным моделированием динамики контуров увлажнения, проварьированы

и учтены при капельном поливе. Поэтому даже небольшие, на первый взгляд, изменения, которые наблюдаются при добавлении в воду монофосфата калия, могут играть важную роль в развитии и формировании корневой системы. Увеличенная концентрация питательных веществ, «оседающих» именно по границе контура увлажнения после фертигации, способствует устремлению питательных веществ в заданную область.

Полученные результаты позволяют рассчитать поливные нормы для сельскохозяйственных культур на стадии проектирования процесса внесения удобрений с поливной водой в капельном орошении для различных вариантов концентрации монофосфата калия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Алексеев, В. В.** Изучение влияния механического воздействия на скорость и объем поглощения влаги почвой / В. В. Алексеев, И. И. Максимов, П. В. Мишин // Вестник НГИЭИ. – 2018. – № 7 (86). – С. 18–28. – URL: <https://clck.ru/T8PeS> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.
2. **Алексеев, В. В.** Исследование профилей увлажнения почвы с уплотненным слоем при дождевании и поверхностном поливе / В. В. Алексеев // Природообустройство. – 2016. – № 4. – С. 92–96. – URL: <https://clck.ru/T8PhM> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.
3. Mechanized Application of Ameliorants for Preservation of Soil Moisture on Cultivated Lands / S. A. Vasilyev, A. A. Vasilyev, M. Y. Ivanov, A. V. Vasilyeva. – DOI 10.1088/1757-899X/537/6/062018 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 537, Issue 6. – 6 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/537/6/062018> (дата обращения: 04.02.2021).
4. Результаты почвенно-мелиоративных исследований при реконструкции межхозяйственной оросительной системы «Дружба» Чувашской Республики / А. Н. Дмитриев, С. А. Васильев, В. В. Алексеев, И. И. Максимов // Мелиорация и водное хозяйство. – 2016. – № 2. – С. 17–21. – URL: http://mivh.vniigim.ru/download/archive/2016/contents_2016_2.pdf (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.
5. Вероятностная модель определения возможного уровня урожая / В. П. Якушев, В. М. Буре, В. В. Якушев, А. В. Буре // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2014. – № 6. – С. 59–62. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22448363> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.
6. **Добрачев, Ю. П.** Модели роста и развития растений и задача повышения урожайности / Ю. П. Добрачев, А. Л. Соколов // Природообустройство. – 2016. – № 3. – С. 90–96. – URL: <http://elibrary.vniigim.ru/dl/full/gmgup-15-2016-03.pdf/view> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.
7. **Дубенок, Н. Н.** Водопотребление и продуктивность раннего картофеля при спринклерном орошении / Н. Н. Дубенок, А. Ф. Дружкин, Р. А. Чечко // Мелиорация и водное хозяйство. – 2015. – № 1. – С. 15–18. – URL: <http://mivh.vniigim.ru/archive/> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.
8. **Ахмедов, А. Д.** Контурные увлажнения почвы при капельном орошении / А. Д. Ахмедов, Е. Ю. Галиуллина // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее

профессиональное образование. – 2012. – № 3 (270). – С. 183–188. – URL: <https://clck.ru/T8QNd> (дата обращения: 04.02.2021).

9. **Melikhova, E. V.** Computer Simulation and Optimization of Parameters of Configuration of the Contour of Moistening under Drip Irrigation of Agricultures / E. V. Melikhova, A. F. Rogachev. – DOI [10.1007/978-3-030-13397-9_122](https://doi.org/10.1007/978-3-030-13397-9_122) // Ubiquitous Computing and the Internet of Things: Prerequisites for the Development of ICT. Studies in Computational Intelligence, vol. 826 ; E. Popkova, ed. – Cham : Springer, 2019. – Pp. 1193–1201. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-13397-9_122 (дата обращения: 04.02.2021).

10. Разработка рабочего органа для внесения жидких мелиорантов в почву при плоскорезной обработке / С. А. Васильев, А. А. Васильев, И. И. Максимов, В. В. Алексеев // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2014. – № 1. – С. 55–58. – URL: <http://www.sgau.ru/files/pages/846/13917752460.pdf> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

11. Оптимальное управление поливами на основе современных вычислительных алгоритмов / В. В. Бородычев, М. Н. Лытов, А. С. Овчинников, В. С. Бочарников // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2015. – № 4 (40). – С. 21–28. – URL: <https://clck.ru/T8Sz9> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

12. **Кирейчева, Л. В.** Модели и информационные технологии управления водопользованием на мелиоративных системах, обеспечивающие благоприятный мелиоративный режим / Л. В. Кирейчева, И. Ф. Юрченко, В. М. Яшин // Мелиорация и водное хозяйство. – 2014. – № 5–6. – С. 50–55. – URL: <http://mivh.vniigim.ru/archive/> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

13. **Ольгаренко, В. И.** Применение метода Монте-Карло для моделирования рисков планируемого орошения / В. И. Ольгаренко, И. Ф. Юрченко, И. В. Ольгаренко // Научная жизнь. – 2017. – № 2. – С. 11–19. – URL: http://www.sced.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=577:nauchnaya-zhizn-02-2017&catid=43:uncategorised&Itemid=156 (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

14. **Фалькович, А. С.** Функции влагопроводности трещиноватых темно-каштановых почв Заволжья / А. С. Фалькович // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2011. – № 7. – С. 66–68. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16531726> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

15. **Муромцев, Н. А.** Определение коэффициента влагопроводности почв в почвенных колоннах и лизиметрах / Н. А. Муромцев. – DOI [10.19047/0136-1694-2013-72-84-95](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-72-84-95) // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. – 2013. – Вып. 72. – С. 84–95. – URL: <https://bulletin.esoil.ru/jour/article/view/525> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

16. **Шкура, В. Н.** Об учете почвенных водно-физических характеристик при определении параметров контуров капельного увлажнения почвы / В. Н. Шкура, А. С. Штанько // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2017. – № 4 (28). – С. 137–153. – URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=336> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

17. Изменение контактных углов смачивания при добавлении в моющие растворы поверхностно-активных веществ / Н. В. Бышов, И. А. Успенский, В. В. Алексеев, И. В. Фадев. – DOI [10.15507/2658-4123.029.201902.295-305](https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.295-305) // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 2. – С. 295–305. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/82-19-2/707-10-15507-0236-2910-029-201902-10> (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

18. Automation of Determining the Contact Angle of Washing Liquids Wetting / V. V. Alekseev, V. P. Philippov, I. V. Fadeev, S. I. Chuchkalov. – DOI [10.1088/1742-6596/1333/4/042001](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/4/042001) // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1333, Issue 4. – 5 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1333/4/042001> (дата обращения: 04.02.2021).

19. Получение основной гидрофизической характеристики почв на основе идеализированных моделей / В. А. Сысуев, И. И. Максимов, В. В. Алексеев, В. И. Максимов // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2013. – № 5. – С. 63–66. – URL: http://www.cnsbh.ru/jour/j_as.asp?id=117606 (дата обращения: 04.02.2021). – Рез. англ.

20. Hydrophysical Aspects of Soil Assessment in Melioration / V. V. Alekseev, R. I. Aleksandrov, S. A. Vasiliev, S. I. Chuchkalov. – DOI [10.1088/1755-1315/341/1/012106](https://doi.org/10.1088/1755-1315/341/1/012106) // IOP Conference Series:

Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 341. – 6 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/341/1/012106> (дата обращения: 04.02.2021).

21. Simulation of Drip Irrigation on Slope Lands / V. Alekseev, S. Chuchkalov, V. Philippov [et al.]. – DOI 10.1051/bioconf/20201700218 // Proceedings of International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2019). – 2020. – Vol. 17. – 5 p. – URL: https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/full_html/2020/01/bioconf_fies2020_00218/bioconf_fies2020_00218.html (дата обращения: 04.02.2021).

Поступила 18.09.2020; одобрена после рецензирования 15.10.2020; принята к публикации 29.10.2020

Об авторах:

Успенский Иван Алексеевич, заведующий кафедрой технической эксплуатации транспорта ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева» (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: B-7990-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, Scopus ID: 57193743041, ivan.uspenskiy@yandex.ru

Фадеев Иван Васильевич, заведующий кафедрой машиноведения ФГБОУ ВО «Чувашский государственный педагогический университет имени И. Я. Яковлева» (428000, Российская Федерация, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, д. 38), доктор технических наук, доцент, Researcher ID: B-8856-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5863-1812>, ivan-fadeev-2012@mail.ru

Алексеев Виктор Васильевич, профессор кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова» (428025, Российская Федерация, г. Чебоксары, Московский пр-т, д. 15), доктор технических наук, доцент, Researcher ID: F-7784-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2780-1727>, av77@list.ru

Филиппов Владимир Петрович, доцент кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова» (428025, Российская Федерация, г. Чебоксары, Московский пр-т, д. 15), кандидат физико-математических наук, Researcher ID: AAD-5183-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7240-4405>, filippov_v_p@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

И. А. Успенский – научное руководство, постановка задачи исследования.

И. В. Фадеев – анализ литературных данных, разработка методики и проведение экспериментальных исследований.

В. В. Алексеев – разработка математической модели и редактирование.

В. П. Филиппов – коррекция математической модели и проведение вычислений.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Alekseev V.V., Maksimov I.I., Mishin P.V. Study of the Influence of Mechanical Impact on Moisture Filtration in Soils. *Vestnik NGIEI = Bulletin NGIEI*. 2018; (7):18-28. Available at: <https://clck.ru/T8PeS> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)

2. Alexeev V.V. Investigation of Profiles of Soils Moistening with a Compacted Layer under Overhead and Surface Irrigation. *Prirodoobustroystvo = Nature Conservation*. 2016; (4):92-96. Available at: <https://clck.ru/T8PhM> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)

3. Vasilyev S.A., Vasilyev A.A., Ivanov M.Y., et al. Mechanized Application of Ameliorants for Preservation of Soil Moisture on Cultivated Lands. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 537(6). 6 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/6/062018> (In Eng.)

4. Dmitriev A.N., Vasilyev S.A., Alekseev V.V., et al. The Results of Soils Hydrophysical and Erosion Properties Experimental Research on Chuvash Republic Inter-Farm Irrigation System “Druzhba” Rebuilding. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* = Melioration and Water Management. 2016; (2):17-21. Available at: http://mivh.vniigim.ru/download/archive/2016/contents_2016_2.pdf (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
5. Yakushev V.P., Bure V.M., Yakushev V.V., et al. Probable Model for Determining Possible Yield Level. *Doklady Rossiyskoy akademii selskokhozyaystvennykh nauk* = Papers of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 2014; (6):59-62. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22448363> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
6. Dobrachev Yu.P., Sokolov A.L. Models of Plants Growth and Development and Task of Raising Crops Productivity. *Prirodoobustroystvo* = Nature Conservation. 2016; (3):90-96. Available at: <http://elib.timacad.ru/dl/full/gmgup-15-2016-03.pdf/view> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
7. Dubenok N.N., Druzhkin A.F., Chechko R.A. Water Consumption and Efficiency of Early Potatoes under Sprinkler Irrigation. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* = Melioration and Water Management. 2015; (1):15-18. Available at: <http://mivh.vniigim.ru/archive/> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
8. Akhmedov A.D., Galiullina Ye.Yu. [Soil Moisture Contours in Drip Irrigation]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie* = News of the Nizhnevolzhsk Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. 2012; (3):183-188. Available at: <https://clck.ru/T8QNd> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
9. Melikhova E.V., Rogachev A.F. Computer Simulation and Optimization of Parameters of Configuration of the Contour of Moistening under Drip Irrigation of Agricultures. In: E. Popkova, ed. *Ubiquitous Computing and the Internet of Things: Prerequisites for the Development of ICT. Studies in Computational Intelligence*, vol. 826. Cham: Springer; 2019. 1193-1201 p. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-13397-9_122
10. Vasilyev S.A., Vasilyev A.A., Maximov I.I., et al. Development of a Working Body for Application of the Liquid Ameliorants in the Soil when Subsurface Processing. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova* = Vavilov Saratov State Agrarian University Bulletin. 2014; (1):55-58. Available at: <http://www.sgau.ru/files/pages/846/13917752460.pdf> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
11. Borodychev V.V., Lytov M.N., Ovchinnikov A.S., et al. Optimum Control of Waterings on the Basis of Modern Computing Algorithms. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie* = News of the Nizhnevolzhsk Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. 2015; (4):21-28. Available at: <https://clck.ru/T8Sz9> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
12. Kireycheva L.V., Yurchenko I.F., Yashin V.M. Models and Information Technologies for Water Management on the Reclamation System, Which Provides Favorable Reclamation Mode. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* = Melioration and Water Management. 2014; (5-6):50-55. Available at: <http://mivh.vniigim.ru/archive/> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
13. Olgarenko V.I., Yurchenko I.F., Olgarenko I.V. Application of Monte Carlo Method to Simulate the Planned Irrigation Risks. *Nauchnaya zhizn* = Scientific Life. 2017; (2):11-19. Available at: http://www.sced.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=577:nauchnaya-zhizn-02-2017&catid=43:uncategorised&Itemid=156 (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
14. Falkovich A.S. Moisture Conductivity Functions of the Cracked Dark-Chestnut Soils of Zavolzhye. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova* = Vavilov Saratov State Agrarian University Bulletin. 2011; (7):66-68. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16531726> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)
15. Muromtsev N.A. Methods of Determining the Coefficient of Water Conductivity in Soils. *Bulleten Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva* = Dokuchaev Soil Bulletin. 2013; (72):84-95. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-72-84-95>
16. Shkura V.N., Shtanko A.S. Consideration of Soil Hydrophysical Characteristics in Determining the Contour Parameters of Drip Irrigation. *Nauchnyy zurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii* = Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement. 2017; (4):137-153. Available at: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=336> (accessed 04.02.2021). (In Russ.)

17. Byshov N.V., Uspensky I.A., Alekseev V.V., et al. Changing the Contact Wetting Angles when Adding Surface-Active Substances to Washing Solutions. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(2):295-305. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.295-305>

18. Alekseev V.V., Philippov V.P., Fadeev I.V., et al. Automation of Determining the Contact Angle of Washing Liquids Wetting. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1333(4). 5 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/4/042001>

19. Sysuev V.A., Maksimov I.I., Alekseev V.V., et al. Receiving Water Retention Curve on Idealized Models. *Doklady Rossiyskoy akademii selskokhozyaystvennykh nauk* = Papers of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 2013; (5):63-66. Available at: http://www.cnsnb.ru/jour/j_as.asp?id=117606 (accessed 04.02.2021). (In Russ.)

20. Alekseev V.V., Aleksandrov R.I., Vasiliev S.A., et al. Hydrophysical Aspects of Soil Assessment in Melioration. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 341. 6 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/341/1/012106>

21. Alekseev V., Chuchkalov S., Philippov V., et al. Simulation of Drip Irrigation on Slope Lands. In: Proceedings of International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources" (FIES 2019). 2020; 17. 5 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700218>

Submitted 18.09.2020; approved after reviewing 15.10.2020; accepted for publication 29.10.2020

About the authors:

Ivan A. Uspensky, Head of the Chair of Technical Operation of Transport, Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev (1 Kostychev St., Ryazan 390044, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: B-7990-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, Scopus ID: 57193743041, ivan.uspensckij@yandex.ru

Ivan V. Fadeev, Head of the Chair of Mechanical Engineering, Chuvash I. Yakovlev State Pedagogical University (38 K. Marks St., Cheboksary 428000, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: B-8856-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5863-1812>, ivan-fadeev-2012@mail.ru

Victor V. Alekseev, Professor of the Chair of General Physics, Chuvash I. N. Ulyanov State University (15 Moskovskiy Prospekt, Cheboksary 428025, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Researcher ID: F-7784-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2780-1727>, av77@list.ru

Vladimir P. Filippov, Associate Professor of the Chair of Mathematics and Hardware Support for Information Systems, Chuvash I. N. Ulyanov State University (15 Moskovskiy Prospekt, Cheboksary 428025, Russian Federation), Cand.Sc. (Phys.-Math.), Researcher ID: AAD-5183-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7240-4405>, filippov_v_p@mail.ru

Contribution of the authors:

I. A. Uspensky – scientific guidance, formulation of the research task.

I. V. Fadeev – analysis of literary data, development of methodology and experimental research.

V. V. Alekseev – development of a mathematical model and editing.

V. P. Filippov – correcting the mathematical model and performing calculations.

All authors have read and approved the final manuscript.