ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. АГРОИНЖЕНЕРИЯ

DOI: 10.32786/2071-9485-2021-01-35

DIGITAL TECHNOLOGIES AND INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS OF THE IRRIGATION COMPLEX TAKING INTO ACCOUNT THE ACTUAL MOISTURE RESERVES

D. A. Solovyev, G.N. Kamyshova, D. A. Kolganov, N. N. Terekhova

Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov, Saratov

Received 06.02.2021

Submitted 12.03.2021

Summary

Based on digital and intelligent technologies, a control system for the irrigation complex was developed, taking into account the actual moisture reserves. It allows both to optimize irrigation rates, depending on the level of actual moisture reserves of the field areas, and to ensure optimal operation of sprinkler equipment at each irrigation site by introducing neurocontrollers into the control system. The proposed architecture of an intelligent control system for an irrigation complex makes it possible both to integrate it into the structure of digital decision support platforms and to use it in the development of new types of sprinkler machines.

Abstract

Introduction. Irrigation technical means based on intelligent and digital technologies are in demand on the domestic market, since the task is to increase both the economic and environmental efficiency of irrigated lands and ensure import substitution of foreign sprinkler equipment. Thus, the expediency of developing domestic technologies for improving irrigation systems based on digital technologies and artificial intelligence methods is obvious. **Object.** The object of research is digital models of soil moisture parameters for differentiating irrigation regimes and neural network methods for controlling of irrigation machines. **Materials and methods.** The paper considers an approach to the design of an intelligent control system for an irrigation complex, taking into account the actual moisture reserves based on digital technology for differentiating irrigation regimes by the depth of the calculated soil layer and pre-irrigation moisture threshold and optimizing the control of sprinklers based on artificial neural networks. The study is based on research materials carried out on the experimental farm of the university and databases of long-term observations of the main irrigated crops in the Saratov region. **Results and conclusions.** Based on digital and intelligent technologies, a control system for the irrigation complex was developed, taking into account the actual moisture reserves. This allows both to optimize irrigation rates depending on the level of actual moisture reserves in specific areas of the field, and to support optimal performance of irrigation equipment at each irrigation site by introducing neurocontrollers into the control system. The proposed architecture of an intelligent control system for an irrigation complex makes it possible both to integrate it into the structure of digital decision support platforms and to use it in the development of new types of sprinkler machines.

Key words: *digital technologies, intelligent systems, actual moisture reserves, differentiation of irrigation modes, neural network methods.*

Citation. Solovyev D.A., Kamyshova G.N., Kolganov D.A., Terekhova N.N. Digital technologies and intelligent control systems of the irrigation complex taking into account the actual moisture reserves. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2021. 1(61). 368-379 (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2021-01-35.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

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

УДК 631.171, 631.67

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОРОСИТЕЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ С УЧЕТОМ ФАКТИЧЕСКИХ ВЛАГОЗАПАСОВ

Д. А. Соловьев, доктор технических наук, доцент

Г. Н. Камышова, кандидат физико-математических наук, доцент

Д. А. Колганов, кандидат технических наук, доцент

Н. Н. Терехова, кандидат технических наук, доцент

Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова, г. Саратов

Дата поступления в редакцию 06.02.2021

Дата принятия к печати 12.03.2021

Актуальность. Технические средства орошения на основе интеллектуальных и цифровых технологий востребованы отечественным рынком в силу необходимости решения проблемы повышения экономической и экологической эффективности эксплуатации орошаемых земель и обеспечения импортозамещения зарубежной дождевальной техники. Таким образом, очевидна целесообразность разработки отечественных технологий совершенствования оросительных комплексов на основе цифровых технологий и методов искусственного интеллекта. **Объект исследования** – цифровые модели параметров увлажнения почвы для дифференциации режимов орошения и нейросетевые методы управления дождевальными машинами. **Материалы и методы.** Рассматривается подход к проектированию интеллектуальной системы управления оросительным комплексом с учетом фактических влагозапасов на основе цифровой технологии дифференциации режимов орошения по предполивному порогу влажности и глубине расчетного слоя почвы и интеллектуальные, нейросетевые методы оптимизации управления дождевальными машинами. Исследование основано на материалах исследований, проводимых на базе экспериментального хозяйства университета и базах данных многолетних наблюдений основных поливных культур Саратовской области. **Результаты и выводы.** Представлены результаты разработки интеллектуальной системы управления оросительным комплексом с учетом фактических влагозапасов, позволяющей как оптимизировать нормы полива в зависимости от уровня фактических влагозапасов участков поля, так и обеспечивать оптимальную эксплуатацию дождевальной техники на каждом участке орошения за счет внедрения нейроконтроллеров в систему управления. Предложенная архитектура интеллектуальной системы управления оросительным комплексом позволяет как интегрировать ее в структуру цифровых платформ поддержки принятия решений, так и использовать при разработке новых образцов дождевальных машин.

Ключевые слова: цифровые технологии, интеллектуальные системы управления, фактические влагозапасы, дифференциация режимов орошения, нейроконтроллеры.

Цитирование. Соловьев Д. А., Камышова Г. Н., Колганов Д. А., Терехова Н. Н. Цифровые технологии и интеллектуальные системы управления оросительным комплексом с учетом фактических влагозапасов. *Известия НВ АУК*. 2021. 1(61). 368-379. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-01-35.

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. Изменение климата, сокращение площадей сельскохозяйственных угодий и недостаток водных ресурсов выступают ключевыми вызовами на фоне стремительного увеличения спроса на продовольствие. В аграрном секторе происходит трансформация, вызванная новыми технологиями, что позволит этому сектору перейти на новый уровень производительности. Точное земледелие, которое заключается в

применении необходимых ресурсов, когда и где это необходимо, стало третьей волной современной аграрной революции. В настоящее время расширяется применение цифровых и интеллектуальных технологий за счет увеличения доступности больших объемов данных и технологий их обработки. Большие данные теперь используются для того, чтобы дать фермерам прогностическую информацию о сельскохозяйственных операциях и операционных решениях в режиме реального времени. Искусственный интеллект в режиме реального времени позволяет компьютерным программам генерировать подробные рекомендации и идеи, помогающие фермерам принимать правильные решения. Несмотря на то, что в России существует значительный потенциал земельных и водных ресурсов для орошаемого земледелия, достичь кардинального повышения эффективности сельского хозяйства в целом и орошаемого земледелия в частности можно только за счет цифровизации и интеллектуализации. Это доказывает опыт ведущих мировых аграрных стран, для которых доля фермерских хозяйств, использующих цифровые технологии, составляет от 60 % (США) до 80 % (страны Евросоюза). А в России по оценкам экспертов это только 10 %. При этом общий уровень цифровизации находится на пятнадцатом месте в мире, а уровень цифровизации сельского хозяйства на сорок пятом [2]. По данным Международного института исследований продовольственной политики, цифровые технологии могут помочь нам достичь увеличения продуктивности фермерских хозяйств на 67 % к 2050 году [11].

Техническое обеспечение орошаемого земледелия - один из центральных параметров его эффективности. В последнее десятилетие, самым активным образом в орошаемое земледелие внедряются многоопорные дождевальные машины кругового действия зарубежного и отечественного производства. Зарубежная дождевальная техника обладает более высокими характеристиками автоматизации и надежности полива, но при этом и значительной стоимостью и зачастую сложностью эксплуатации [3].

В последние годы большое количество зарубежных исследований было сосредоточено на применении методов интеллектуального анализа данных и глубокого обучения для повышения эффективности орошения. Так, Е. Гуисти и С. Марсили-Либеле [7] разработали интеллектуальную систему управления орошением на основе фузи логики, Х. Наварро-Хел, Ж. Мартинез дель Рикон, Р. Доминго-Мингуель и Ф. Сото [5] систему поддержки принятия решений для управления орошением, Х. Сонг, Ж. Джанг, Ф. Ли, Ю. Жао и Ж. Янг [9] исследовали пространственно-временное распределение влажности почвы. В то же самое время, интеллектуальные и цифровые технологии и технические средства орошения на их основе в России развиты очень слабо. Целью исследования является разработка решений по совершенствованию управления оросительными комплексами на основе цифровых технологий и методов искусственного интеллекта.

Материалы и методы. Исследования по разработке концепции интеллектуальной системы управления оросительным комплексом с учетом фактических влагозапасов проводились в Саратовской области. Объектом исследований выступает совокупность параметров увлажнения почвы для дифференциации режимов орошения и параметров управления дождевальными машинами. Экспериментальные исследования проводились в Саратовской области (Россия) в учебно-научно-производственном объединении «Поволжье» Саратовского государственного аграрного университета и экспериментальной площадке ООО «Наше дело». Помимо этого, применялись данные многолетних исследований основных сельскохозяйственных культур на основных орошаемых участках Саратовской области. Техническим объектом моделирования выступила дождевальная машина кругового действия «Каскад» с соответствующим оборудованием, позволяющим в режиме реального времени отображать данные в комплексной цифровой платформе Агросигнал.

В основу проектирования интеллектуальной системы управления оросительным комплексом положены две составляющие:

1) Дифференциация режимов орошения с учетом дифференцированной потребности поливных культур в воде в разные фазы роста и развития и пространственную изменчивость природных условий конкретного орошаемого агроландшафта.

2) Оптимизация управления дождевальными машинами, позволяющая обеспечить точность достижения оптимальных норм полива в зависимости от уровня фактических влагозапасов участков поля.

Первая составляющая – это цифровая технология, реализованная на высокоуровневом языке программирования Python, оптимизации параметров увлажнения расчетного слоя почвы на основе баз данных и знаний определения оптимальных параметров увлажнения расчетного слоя почвенных разностей Саратовской области для основных поливных культур. Вторая составляющая – нейроконтроллеры, интегрированные в систему управления дождевальной машины, обеспечивающие точность внесения оптимальных норм полива на каждом участке.

Результаты и обсуждение. В связи с тем, что основными параметрами, определяющими величину поливной нормы, являются мощность увлажняемого слоя почвы и ее предполивная влажность, вытекающие из биологических особенностей возделываемой культуры в различные фазы роста и развития, а также плотность сложения и влажность при наименьшей влагоемкости увлажняемых горизонтов почвы, значительно различающиеся для разных почвенных разностей и гранулометрических составов, неверный их выбор может привести как к иссушению корнеобитаемого слоя, соответственно к потере продуктивности поливных посевов, так и к избыточной водоподаче, приводящей к непроизводительным потерям оросительной воды, ее фильтрации в грунтовые воды, достигающей на отдельных оросительных системах Саратовской области 15-20 % от суммарной подачи воды на орошение.

Каждая дождевальная машина в составе оросительного комплекса расположена на конкретном участке, имеющем определенные гео-координаты, что обуславливает наличие пространственной изменчивости почвенных, геоморфологических, гидрогеологических условий (рисунк 1). Помимо этого, возможно наличие пространственно-временной изменчивости как сельскохозяйственной культуры, так и ее фазы роста и развития.

Рисунок 1 – Оросительный комплекс с широкозахватными дождевальными машинами кругового действия на участке исследования: слой цифровой карты (сверху), снимок (снизу)

Figure 1 – Irrigation complex with wide-grip pivot irrigation machines in the study area: digital map layer (top), snapshot (bottom)

Как известно, поливные нормы (m , $\text{м}^3/\text{га}$) определяются исходя из основных водно-физических свойств орошаемых почв и особенностей водопотребления растений, по формуле А. Н. Костякова (например, ГОСТ Водопотребность для орошения сельскохозяйственных культур):

$$m = 100hr(W_{\text{нв}} - W_{\text{нпв}}), \quad (1)$$

где h (м) – величина и γ ($\text{т}/\text{м}^3$) – плотность расчетного слоя почвы; $W_{\text{нв}}$ и $W_{\text{нпв}}$ – влажность, соответствующая наименьшей влагоемкости почвы и нижнему предполивному порогу влажности почв, % к массе абсолютно сухой почвы.

Для таких поливных культур, как соя, кукуруза, озимая пшеница, сорго, люцерна, сахарная свекла, картофель, козлятник, просо, костер был проведен анализ условий поливного земледелия Саратовской области. Исходя из этого были установлены дифференциации режимов орошения, учитывающие предполивной порог влажности и глубину увлажняемого слоя.

Для оптимизации параметров увлажнения на основе разработанных баз данных и знаний определения оптимальных параметров увлажнения расчетного слоя почвенных разностей Саратовской области для основных поливных культур разработана цифровая технология на базе языка программирования Python. Демонстрация работы приведена на рисунке 2.

а)

б)

Рисунок 2 – Экранные формы выбора типа почвы и сельскохозяйственной культуры (а) и вывода оптимальных параметров увлажнения (б)

Figure 2 – Screen forms for selecting the type of soil and agricultural crops (а) and displaying the optimal moisture parameters (б)

Результатом ее работы является нахождение оптимального параметра поливной нормы m_k^* для к-того участка орошения с учетом типа почвы, ее гранулометрического состава и информации о сельскохозяйственной культуре, ее фазе роста и развития.

Вторым компонентом интеллектуальной системы выступает управление дождевальной машиной на участке орошения.

На основе данных полевых исследований на экспериментальной базе проведен анализ треков движения и фактических скоростей движения дождевальной машины в режиме реального времени в привязке к геолокации (рисунок 3). Анализ показал, что фактические значения имеют отклонения от устанавливаемых, и показатель отклонения составляет 8-13 % в зависимости от пространственной и временной локации. Поливные нормы при этом имеют отклонения на 7,4-11 % от требуемых.

Рисунок 3 – Треки движения и графики скоростей дождевальной машины кругового действия

Figure 3 – Tracks and speed graphs of pivot irrigation machines

Известно [4], что поливная норма :

$$m = \frac{600Q}{2\pi RV_c},$$

где V_c – средняя скорость движения тележки, м/мин., Q – расход воды дождевальной машиной и R – радиус полива.

Таким образом, она является функцией скорости:

$$m = f(V).$$

Поэтому достижение оптимального значения поливной нормы m_k^* для к-того участка орошения возможно только за счет внедрения эффективных механизмов управления скоростью дождевальной техники. К таким механизмам можно отнести нейроконтроллеры скорости дождевальной машины. Нейроуправление техническими объектами относится к активно развивающемуся современному направлению интеллектуализации технических систем [10]. Многослойные нейронные сети [12] имеют многочисленные применения в управлении техническими объектами и системами. В этой связи их можно использовать для управления дождевальными машинами как адаптивные регуляторы. При этом управляющее воздействие с оптимальными характеристиками вырабатывается в ходе обучения нейросети, и именно оно поступает на вход системы. В нашем случае оптимальное значение скорости V_k^* находится из уравнения:

$$m_k^* = f(V).$$

Внедрение методов нейроуправления в системы управления оросительными машинами позволяет повысить качество их функционирования. Непосредственно в вычислительном модуле системы синтезируется нейроконтроллер, который для заданного момента времени при известных значениях входных возмущений находит значение управляющего воздействия с последующей его реализацией в модуль контроля. Задача управления нейронной сетью – максимально приблизить фактическое значение скорости к требуемому V_k^* .

Для синтеза нейроконтроллера можно использовать различные программные продукты. Нами использовался алгоритм, реализованный в среде Matlab (пакет Neural Network Toolbox) [6]. Схема нейронной сети и результаты нейромоделирования показаны на рисунке 4.

Рисунок 4 – Схема нейронной сети (сверху) и результаты нейромоделирования в Matlab (снизу)

Figure 4 – Neural network diagram (top) and results of neuromodeling in Matlab (bottom)

После обучения регулятор используется в контуре управления, снижая отклонения до 1-3 %. Модель синтеза нейрорегуляторов и нейроуправления скоростью дождевальных машин исследована в [1], [8], где также представлена функциональная схема управления с интегрированным нейрорегулятором.

Таким образом, архитектура интеллектуальной системы управления оросительным комплексом с учетом фактических влагозапасов имеет вид (рисунок 5):

Рисунок 5 – Архитектура интеллектуальной системы управления оросительным комплексом

Figure 5 – Architecture of an intelligent control system for an irrigation complex

Результаты исследований по апробации предложенной системы показали следующие результаты. На примере кукурузы на зерно был произведен расчет поливных норм всего орошаемого массива (таблица 1).

Таблица 1 – Расчет поливных норм кукурузы на зерно

Table 1 – Calculation of irrigation rates of maize for grain

Наименование величин / Name of quantities	Фаза вегетации кукурузы / Maize vegetation phase			
	Посев- всходы / Sowing- seedlings	6-7 настоящих листьев / 6-7 true leaves	Вымет ме- телки / Sweep the panicles	Молочная спелость / Milk ripeness
Глубина расчетного слоя, м / Design layer depth, m	0,5	0,7	0,8	0,8
Плотность, т/м ³ / Density, t / m ³	1,24	1,25	1,27	1,27
Наименьшая влагоемкость, % The smallest moisture capacity, %	21,8	20,7	20,1	20,1
Влажность при нижнем пороге, %НВ / Humidity at the lower threshold,% НВ	0,70	0,75	0,75	0,70
Принятая поливная норма, м ³ /га Accepted irrigation rate, m ³ / ha	400	450	500	600

Рассмотрев 40 участков орошения и произведя расчет поливных норм с использованием цифровой технологии оптимизации параметров увлажнения на основе баз данных и знаний определения оптимальных параметров увлажнения расчетного слоя почвенных разностей Саратовской области для основных поливных культур, найдены отклонения принятых поливных норм от оптимальных (расчетных) с учетом пространственно временной изменчивости конкретного орошаемого участка. Вторым этапом

исследовалось отклонение поливных норм, возникающее вследствие неоптимальной работы дождевальной техники, а именно отклонения фактических скоростей от требуемых, так называемое техническое. Общие сведения приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Анализ факторов отклонения поливных норм

Table 2 – Analysis of factors of deviation of irrigation rates

Наименование величин / Name of quantities	Количество участков орошения / Number of irrigation sites	
	Расчетный фактор / Settlement factor	Технический фактор / Technical factor
Отклонение поливной нормы < 10 % / Irrigation rate deviation <10%	8	6
Отклонение поливной нормы от 10 % до 20 % / Irrigation rate deviation from 10 % to 20 %	13	11
Отклонение поливной нормы от 20 % до 50 % / Irrigation rate deviation from 20 % to 50 %	10	12
Отклонение поливной нормы > 50 % / Irrigation rate deviation >50 %	9	11

Тестирование системы управления осуществлялось на основе интеграции в комплексную цифровую платформу «Агросигнал» в научно-производственном объединении Саратовского государственного аграрного университета и показала повышение качества орошения и экономию около 10 % оросительной воды.

Выводы. Цифровые технологии, искусственные нейронные сети и основанные на них интеллектуальные технологии способны значительно повысить эффективность орошаемого земледелия за счет обеспечения высокого уровня точности орошения как в пространстве, так и во времени. Предложена архитектура интеллектуальной системы управления оросительным комплексом с учетом фактических влагозапасов. Она позволяет как оптимизировать нормы полива в зависимости от уровня фактических влагозапасов участков поля, так и обеспечивать оптимальную эксплуатацию дождевальной техники на каждом участке орошения за счет внедрения нейроконтроллеров в систему управления. Комбинация цифровых технологий и интеллектуальных систем управления техникой позволяет значительно снизить отклонения, оптимизируя таким образом параметры качества орошения. Разработанная система может быть востребована вследствие простоты ее использования как в системах поддержки принятия решений, так и возможности непосредственного внедрения в системы управления оросительными комплексами при разработке современных дождевальных машин.

Библиографический список

1. Моделирование нейроуправления скоростью дождевальных машин / Д. А. Соловьев, Г. Н. Камышова, Н. Н. Терехова, С. М. Бакиров // Аграрный научный журнал. 2020. № 7. С. 81-84.
2. Мониторинг и прогнозирование научно-технологического развития АПК в области точного сельского хозяйства, автоматизации и роботизации / Е. В. Труфляк [и др.]. Краснодар: КубГАУ, 2017. 199 с.
3. Ольгаренко Г. В. Реализация программы импортозамещения в области производства техники полива в Российской Федерации // Мелиорация и водное хозяйство. 2018. № 1. С. 44-47.
4. Соловьев Д. А., Журавлева Л. А. Влияние режима движения дождевальных машин на норму полива // Вестник АПК Верхневолжья. 2018. № 1 (41). С. 38-43.
5. A decision support system for managing irrigation in agriculture / H. Navarro-Hellin, J. Martinez-del-Ricon, R. Domingo-Miguel, F. Soto // Computers and Electronics in Agriculture. 2016. Vol. 124. P. 121-131.
6. Beale M., Hagan M., Demuth H. Neural Network Toolbox User's Guide // The MathWorks.

Natick. 2015. 846 p.

7. Giusti E., Marsili-Libelli S. Fuzzy decision support system for irrigation and water conservation in agriculture // *Environmental Modeling&Software*. 2015. Vol. 63. P. 73-86.

8. Improving the efficiency of circular irrigation machines based on models of neural network irrigation control / D. Solovyev, G. Kamyshova, S. Zatinatsky, D. Kolganov, N. Terekhova // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 175. 05007.

9. Modeling spatio-temporal distribution of soil moisture by deep learning-based cellular automata model / X. Song, G. Zhang, F. Liu, D. Li, Y. Zhao, J. Yang // *Journal of Arid Land*. 2016. № 8. P. 734-748.

10. On Replacing PID Controller with Deep Learning Controller for DC Motor System / K. Cheon, J. Kim, M. Hamadache, D. Lee // *Journal of Automation and Control Engineering*. 2015. V. 3. № 6. P. 452-456.

11. Otsuka K., Fan Sh. Agricultural development: New perspectives in a changing // *International Food Policy Research Institute (IFPRI)*, Washington DC, 2021.

12. Schmidhuber J. Deep Learning in neural networks: An overview // *Neural Networks*. 2015. V. 61. P. 85-117.

Conclusions. Digital technologies, artificial neural networks and intelligent technologies based on them can significantly increase the efficiency of irrigated agriculture by ensuring a high level of irrigation accuracy both in space and in time. The architecture of an intelligent control system for an irrigation complex is proposed, taking into account the actual moisture reserves. It allows both to optimize irrigation rates, depending on the level of actual moisture reserves of the field areas, and to ensure optimal operation of sprinkler equipment at each irrigation site by introducing neurocontrollers into the control system. The combination of digital technologies and intelligent control systems for equipment can significantly reduce deviations, thus optimizing the parameters of irrigation quality. The developed system can be in demand due to its ease of use both in decision support systems and the possibility of direct implementation into control systems of irrigation complexes in the development of modern sprinkler machines. control systems of irrigation complexes in the development of modern irrigation machines.

References

1. Simulation of neurocontrol of the speed of sprinkler machines / D. A. Soloviev, G. N. Kamyshova, N. N. Terekhova, S. M. Bakirov // *Agrarian scientific journal*. 2020. № 7. P. 81-84.

2. Monitoring and forecasting of scientific and technological development of the agro-industrial complex in the field of precision agriculture, automation and robotization / E. V. Truflyak [et al.]. Krasnodar: KubGAU, 2017. 199 p.

3. Olgarenko G. V. Implementation of the import substitution program in the production of irrigation equipment in the Russian Federation // *Melioration and water management*. 2018. № 1. P. 44-47.

4. Soloviev D. A., Zhuravleva L. A. Influence of the mode of movement of sprinklers on the irrigation rate // *Bulletin of APK Verkhnevolzhya*. 2018. № 1 (41). P. 38-43.

5. A decision support system for managing irrigation in agriculture / H. Navarro-Hellin, J. Martinez-del-Ricon, R. Domingo-Miguel, F. Soto // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016. Vol. 124. P. 121-131.

6. Beale M., Hagan M., Demuth H. Neural Network Toolbox User's Guide // *The MathWorks*. Natick. 2015. 846 p.

7. Giusti E., Marsili-Libelli S. Fuzzy decision support system for irrigation and water conservation in agriculture // *Environmental Modeling&Software*. 2015. Vol. 63. P. 73-86.

8. Improving the efficiency of circular irrigation machines based on models of neural network irrigation control / D. Solovyev, G. Kamyshova, S. Zatinatsky, D. Kolganov, N. Terekhova // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 175. 05007.

9. Modeling spatio-temporal distribution of soil moisture by deep learning-based cellular automata model / X. Song, G. Zhang, F. Liu, D. Li, Y. Zhao, J. Yang // *Journal of Arid Land*. 2016. № 8. P. 734-748.

10. On Replacing PID Controller with Deep Learning Controller for DC Motor System / K. Cheon, J. Kim, M. Hamadache, D. Lee // Journal of Automation and Control Engineering. 2015. V. 3. № 6. P. 452-456.

11. Otsuka K., Fan Sh. Agricultural development: New perspectives in a changing // International Food Policy Research Institute (IFPRI), Washington DC, 2021.

12. Schmidhuber J. Deep Learning in neural networks: An overview // Neural Networks. 2015. V. 61. P. 85-117.

Authors Information

Solovyev Dmitry Aleksandrovich, Acting Rector, Dean of the Faculty of Engineering and Environmental Engineering, Head of the Department of Technosphere Safety and Transport and Technological Machines, Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilova (410012, Saratov, Teatralnaya pl. 1), Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: rector@sgau.ru.

Kamyshova Galina Nikolaevna, Head of the Department of Mathematics, Mechanics and Engineering Graphics, Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilova (410012, Saratov, Teatralnaya pl. 1), Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: gkamichova@mail.ru.

Kolganov Dmitry Alexandrovich, Associate Professor of the Department of Technosphere Safety and Transport and Technological Machines, Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilova (410012, Saratov, Teatralnaya pl. 1), candidate of technical sciences, e-mail: dmi.kolg@mail.ru.

Terekhova Nadezhda Nikolaevna, Associate Professor of the Department of Mathematics, Mechanics and Engineering Graphics, Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilova (410012, Saratov, Teatralnaya pl. 1), Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: nterekhova2015@yandex.ru.

Информация об авторах

Соловьев Дмитрий Александрович, врио ректора, декан факультета Инженерии и природообустройства, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность и транспортно-технологические машины» Саратовского государственного аграрного университета имени Н.И. Вавилова (410012, г. Саратов, Театральная пл. 1), доктор технических наук, доцент, e-mail: rector@sgau.ru .

Камышова Галина Николаевна, заведующий кафедрой «Математика, механика и инженерная графика» Саратовского государственного аграрного университета имени Н.И. Вавилова (410012, г. Саратов, Театральная пл. 1), кандидат физико - математических наук, доцент, e-mail: gkamichova@mail.ru.

Колганов Дмитрий Александрович, доцент кафедры «Техносферная безопасность и транспортно-технологические машины» Саратовского государственного аграрного университета имени Н.И. Вавилова (410012, г. Саратов, Театральная пл. 1), кандидат технических наук, e-mail: dmi.kolg@mail.ru

Терехова Надежда Николаевна, доцент кафедры «Математика, механика и инженерная графика» Саратовского государственного аграрного университета имени Н.И. Вавилова (410012, г. Саратов, Театральная пл. 1), кандидат технических наук, доцент, e-mail: nterekhova2015@yandex.ru