

МЕЛИОРАЦИЯ, РЕКУЛЬТИВАЦИЯ И ОХРАНА ЗЕМЕЛЬ

Обзорная статья

УДК 626.824

doi: 10.31774/2222-1816-2021-11-2-1-23

Современные проблемы в управлении водораспределением в магистральных каналах оросительных систем

Александр Александрович Ткачев¹, Игорь Владимирович Ольгаренко²

^{1,2}Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск, Российская Федерация

¹lxtkachev@gmail.com

²danel777888@mail.ru

Аннотация. Цель: проведение анализа состояния современных систем управления распределением воды в оросительных системах и обзор стратегий управления водораспределением в магистральных каналах оросительных систем. **Обсуждение.** Растущее водопотребление и климатические изменения являются основными источниками проблемы нехватки водных ресурсов во всем мире. При увеличении нагрузки на системы транспортировки воды на поля орошения актуальными становятся вопросы исследования современных методов и средств повышения качества управления водораспределением в каналах оросительных систем. В процессе исследований рассмотрены условия управления водораспределением в Донском магистральном канале Ростовской области и выполнен анализ основных применяющихся в настоящее время стратегий управления водораспределением и возможности их реализации в различных условиях, при этом сделан акцент на не решенные в настоящее время проблемы. В результате исследований обоснована необходимость активизации процесса перехода на стратегии автоматизированного управления водораспределением на оросительных системах с использованием математических моделей и современных средств, в т. ч. на адаптивное управление с использованием контроллеров дробного порядка. **Выводы.** В области управления водораспределением в магистральных каналах оросительных систем до сих пор остается ряд проблем как теоретического, так и практического характера, для решения которых необходим системный подход с использованием как традиционных методов, основанных на решении дифференциальных уравнений, теории управления, так и нейронных сетей и облачных вычислений.

Ключевые слова: управление водораспределением, магистральный канал, метод характеристик, идентификация систем, оптимальное управление, адаптивное управление, контроллеры дробного порядка

LAND RECLAMATION, RECULTIVATION AND LAND PROTECTION

Review article

Urgent problems of water distribution management in main canals of irrigation systems

Alexander A. Tkachyev¹, Igor V. Olgarenko²

^{1,2}Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, Russian Federation

¹lxtkachev@gmail.com

²danel777888@mail.ru

Abstract. Purpose: to analyze the state of modern water distribution management systems in irrigation systems and review strategies for water distribution management in main canals of irrigation systems. **Discussion.** Rising water consumption and climate change are major sources of water scarcity worldwide. With the load increase on water transportation to irrigation fields, the issues of researching modern methods and means of improving the quality of water distribution management in irrigation canals become relevant. In the process of research, the conditions for water distribution management in the Don Main Canal Rostov region were considered and an analysis of the main currently used water distribution management strategies and the possibility of their implementation in various conditions was made, with an emphasis on currently unsolved problems. As a result of the research, the need to activate the process of transition to the strategy of automated control of water distribution in irrigation systems using mathematical models and modern means, including adaptive control using fractional controllers, has been substantiated. **Conclusions.** In the field of water distribution management in the main canals of irrigation systems, a number of problems of both theoretical and practical nature still remain, for the solution of which a systematic approach using both traditional methods based on solving differential equations, control theory, and neural networks and cloud calculations is required.

Keywords: water distribution control, main canal, method of characteristics, system identification, optimal control, adaptive control, fractional order controllers

Введение. В настоящее время из-за значительного роста спроса на воду со стороны сельского хозяйства, промышленности и бытового сектора нехватка воды по всему миру неуклонно растет, следовательно, эффективное управление существующими водными ресурсами представляет собой серьезную проблему для сообщества ученых, академиков, политиков, некоммерческих организаций [1]. Основное отличие водных ресурсов планеты состоит в том, что они распределены неравномерно, как территориально, так и во времени [2]. Из этого следует наличие бассейнов и географических районов с нехваткой воды, в т. ч. из-за отсутствия достаточной инфраструктуры, которая позволяет удовлетворить потребности в воде [3]. В различных регионах мира поверхностные и подземные гидроресурсы эксплуатируются чрезмерно, что приводит к сильному воздействию на окружающую среду. С другой стороны, полезные объемы питьевой воды на планете сокращаются, в т. ч. в результате изменения климата, которое вызывает таяние ледников и уменьшение стока в реки, озера, пруды и болота [4]. Значительная часть водных ресурсов на планете загрязнена и (или) засолена и поэтому не может использоваться для потребления людьми, в промышленности и (или) сельском хозяйстве [2]. Следовательно, гидрологи-

ческий баланс, обеспечивающий достаточное водоснабжение промышленных, сельскохозяйственных, коммерческих и коммунально-бытовых потребителей, может быть получен только путем эффективного управления доступными водными ресурсами [5]. Результаты исследований, проведенных в разных странах, включая Россию, Китай, Испанию, Францию, США, Голландию, Японию и др., показывают, что регулирование стока пресной воды, уменьшение его поступления в моря, накопление его в водохранилищах, его распределение, а также предотвращение его загрязнения – это задачи, требующие больших исследований и инвестиций, решение которых невозможно без применения инструментов и технологий автоматического управления [6].

Использование различных методов орошения в сельском хозяйстве позволило значительно увеличить сельскохозяйственное производство, 70 % имеющихся в мире водных ресурсов используется в оросительных системах для подачи воды посевам [7]. Орошение в значительной мере способствует снижению воздействия климатических изменений на посевы, поэтому эффективная эксплуатация ирригационных систем имеет большое значение, в первую очередь для стран, находящихся на таком уровне развития, при котором производство продуктов питания представляет собой приоритетную задачу [6]. Однако пока оросительные системы в странах с высоким уровнем экономики достигают высокой эффективности, в развивающихся странах эта эффективность ниже реальных возможностей из-за ручного управления распределением воды в этих системах, что приводит к значительным технологическим потерям этого важного ресурса [8]. Например, две трети доступной воды теряется во время ее транспортирования по каналам на орошаемые территории и, следовательно, они не используются должным образом при выращивании сельскохозяйственных культур. Типичная эффективность оросительных систем составляет от 30 до 40 % [9]. Поэтому основная проблема ирригационных систем заключа-

ется не только в высоком спросе на оросительную воду, но и в низкой эффективности процессов водоснабжения и распределения [10]. В связи с этим целью настоящего исследования являлось проведение анализа состояния современных систем управления распределением воды в оросительных системах и обзор стратегий управления водораспределением в магистральных каналах оросительных систем.

Обсуждение. Магистральные оросительные каналы являются важнейшими элементами оросительных систем. Эти каналы проектировали и строили для забора воды из источников водоснабжения и подачи в различные точки отвода таким образом, чтобы вода поступала в требуемом количестве для удовлетворения потребности в воде различных пользователей и культур, которым нужен этот ресурс и которые находятся в подкомандной зоне оросительных систем [11]. Как правило, магистральные оросительные каналы имеют большие размеры, поэтому традиционная операция распределения воды вызывает большие потери, потому что излишки требуемой воды не могут быть повторно использованы, это вызывает значительные потери в бьефах каналов на технологические сбросы и фильтрацию [12]. В настоящее время контроль за распределением воды в оросительных каналах осуществляется вручную или с помощью автоматических регуляторов. Ручное управление водораспределением отличается невысокой эффективностью [13] из-за того, что в этом случае каналы имеют избыточные размеры для предотвращения непредвиденных событий, не позволяющих удовлетворить потребности пользователей, поэтому завышение размеров приводит к неэффективному использованию гидроресурсов [10]. Термин «ручное управление» включает дистанционное управление маневрированием затворами, разработанное операторами, использующими электронное оборудование [14].

В качестве объекта исследований, использующего ручное управление затворами, рассмотрим Донской магистральный канал (ДМК). Основ-

ными водовыделами из ДМК являются: Нижне-Донской, Багаевский, Садковский распределительные каналы и Пролетарская ветвь ДМК. Водозабор в эти каналы из ДМК регулируется на их головных сооружениях.

Головные сооружения Нижне-Донского, Садковского и Пролетарского каналов имеют по два рабочих отверстия. Отверстия сооружений должны работать одновременно, каждое должно пропускать половину заданного расхода, независимо от суммарного расхода [15].

Головной водозабор Нижне-Донского канала, расположенный на ПК 272 + 35, сооружен из железобетона в виде открытого шлюза-регулятора с двумя отверстиями шириной по 2,5 м каждое, покрытыми сверху забальной стенкой, с отметкой порога 27,00 м.

Головное сооружение Багаевского канала имеет три рабочих отверстия с максимальной пропускной способностью 13,5 м³/с каждое.

Пропуск заданного расхода производят через отверстия одновременно, поровну через каждое; в случае необходимости допускается пропуск всего расхода через одно, среднее отверстие (расход не более 13,5 м³/с) или через два крайних (суммарный расход не более 27,0 м³/с).

Указанные четыре распределительных канала, пропускающих воду из ДМК, работают обычно на подпертом горизонте.

Ниже приводятся данные о пропускной способности этих сооружений, командных горизонтах ДМК и подпертых максимальных горизонтах в головах распределительных каналов, обеспечивающих максимальные расчетные расходы всех водовыпусков из этих каналов (таблица 1).

Таблица 1 – Пропускная способность водовыделов Донского магистрального канала

Наименование водовыдела	Максимальный расчетный расход водовыдела Q , м ³ /с	Горизонт ДМК, обеспечивающий этот расход (ГВБ), м	Максимальный горизонт в отводящем канале (ГНБ), м	Разность горизонтов Z , м
1 Нижне-Донской	28,8	32,00	30,50	1,50
2 Багаевский	40,0	26,25	25,94	0,31
3 Садковский	11,0	26,25	25,94	0,31
4 Пролетарский	45,0	26,25	26,02	0,22

Однако практика показывает, что жизнеспособное решение проблемы, связанной с повышением эффективности системы орошения, состоит в автоматизации подачи воды в магистральных каналах, это позволяет поднять эффективность данных систем, а также снизить потребление электроэнергии за счет обеспечения адекватного соответствия между запросами и подачей воды [14].

В последние годы применение автоматического управления распределением воды в магистральных оросительных каналах стало значительно увеличиваться и представляет собой область исследований, пользующуюся повышенным вниманием в международной практике, в разных странах существуют различные полностью автоматизированные каналы [10, 13, 14]. Однако необходимо отметить, что исследования, направленные на достижение эффективного автоматического управления распределением воды в таких каналах, недостаточно продвигались и финансировались, несмотря на важность этой проблемы [16]. Это связано с тем, что в данном направлении существует множество нерешенных теоретических и практических задач [17]. Постоянно растущие требования к характеристикам систем управления распределением воды в оросительных каналах вызывают поиск новых эффективных методов и алгоритмов управления этими процессами [18]. Таким образом, наука и технологии сегодня должны разрабатывать и внедрять более эффективные решения в области управления распределением воды в ответ на растущий спрос на воду со стороны сельского хозяйства, промышленности и общества в целом [13, 15].

Для проектирования эффективных систем автоматического управления необходимы математические модели, описывающие адекватное динамическое поведение контролируемых процессов [19]. С поведенческой точки зрения магистральные оросительные каналы считаются процессами со сложной динамикой, поскольку они характеризуются присутствием нелинейности, большими временными задержками, изменяющимися во вре-

мени и зависящими от окружающей среды, сильными взаимодействиями его различных параметров и т. д. [6, 11, 13]. Результаты проведенных исследований нестационарного поведения оросительных каналов показывают, что динамика этих процессов описывается системой нелинейных уравнений Сен-Венана из двух уравнений (уравнения неразрывности и уравнения количества движения, или импульса), нелинейных по частным производным гиперболического типа и со сложными ограничениями [6]. Уравнение неразрывности учитывает баланс масс по контрольному объему и традиционно представлено с точки зрения расхода (Q) и площади (A) выражением [20]:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t},$$

где Q – расход, м³/с;

x – пространственная координата в основном направлении движения воды, м;

A – площадь живого сечения, м²;

t – время, с.

Уравнение количества движения формируется путем приравнивания внешних сил, приложенных к контрольному объему, таких как гравитация, давление, трение, ветер и др. В свободной форме это уравнение можно записать через среднюю продольную скорость (v) [21]:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0,$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;

y – глубина, м;

S_0 – уклон канала;

S_f – уклон трения.

Существуют разные методы решения этих уравнений [6], однако общими для всех являются значительные математические трудности, кото-

рые они представляют, и их ориентация на анализ временных реакций и режимов стационарных оросительных каналов [22], поэтому имеются определенные ограничения применения в управлении этим классом процессов [13].

В настоящее время в моделях, основанных на решениях дифференциальных уравнений Сен-Венана, при расчете одномерного неустановившегося течения используют две основные численные схемы: сетку характеристик и схему метода характеристик на регулярной прямоугольной сетке [23]. Метод характеристик на регулярной прямоугольной сетке позволяет получить решение в прямоугольной сетке координат с фиксированными створами, которые не меняют свое положение в процессе расчета. В 80-х гг. XX в. были предприняты неоднократные попытки внедрить метод характеристик на регулярной прямоугольной сетке для расчета неустановившегося движения воды в открытых руслах, однако это было связано с определенными сложностями при рассмотрении значительного количества бьефов, соединенных последовательно. Возникали непреодолимые трудности расчетов при переходах между бьефами. Другой метод решения – метод сетки характеристик – предполагает отсутствие жесткой, задаваемой заранее сетки точек в плоскости переменных. Определение узлов сетки является составной частью решения. Данный метод обладает геометрической наглядностью, позволяет наиболее точно отразить суть происходящего физического процесса, характеризуется относительной простотой решения и может использоваться в качестве аналогового для сравнения с другими методами.

Схема сетки характеристик может успешно применяться для определения физических характеристик, так как сетка становится более плотной в области, в которой имеет место более быстрое изменение течения. По этой схеме в каждом узле характеристической сетки должны определяться не только зависимые переменные, но и координаты x и t .

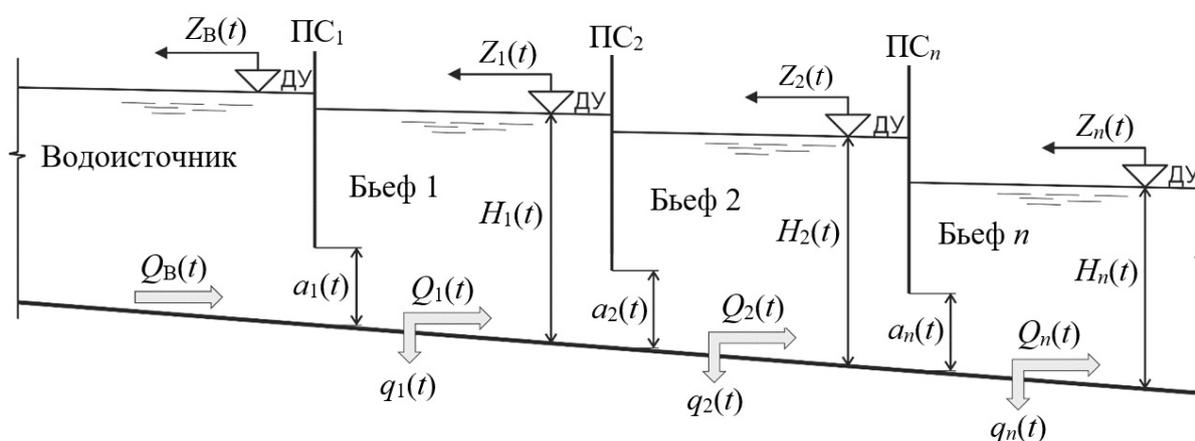
В последние годы для получения адекватных математических моделей динамического поведения оросительных каналов начали применяться процедуры и инструменты идентификации с вполне удовлетворительными результатами [24]. Идентификация систем – важная область теории управления, позволяющая строить математические модели технологических процессов со сложным динамическим поведением на основе наблюдений (измерения) их выходных и входных сигналов, полученных в рабочих условиях, с учетом того, что на эти измерения будут влиять шум, помехи и погрешности [25]. Модели, полученные с применением средств идентификации систем, нашли широкое распространение и применяются при проектировании эффективных систем управления распределением воды в магистральных оросительных каналах [26]. Оросительные каналы должны эксплуатироваться должным образом, чтобы они могли эффективно выполнять свои функции, т. е. регуляторы и оконечное оборудование должны управляться таким образом, чтобы пользователи получали требуемые объемы воды в установленные сроки [6, 9]. В настоящее время эффективный водоучет в оросительных каналах представляет собой достаточно серьезную проблему для научного сообщества [13, 23].

Основная цель управления распределением воды – регулирование уровней и (или) расходов воды путем маневрирования затворами в бьефах каналов, чтобы удовлетворить, несмотря на неопределенности, потребности в воде различных пользователей. При этом гарантируется, что объемы воды соответствуют реальным потребностям, минимизируются производственные потери, а также устраняется возможность повреждения и переполнения каналов [9, 27].

Потребности пользователей ирригационных систем в воде обычно определяются по расходам [6, 9, 13]. Однако регулирование расхода в оросительных каналах является нетривиальной задачей [23], что мотивировало

контролировать значения других параметров меньшей сложности, например уровней воды, на разных участках каналов [28].

Контроль уровня на участке оросительного канала осуществляется одним из следующих методов: по верхнему бьефу сооружений, по нижнему бьефу сооружений, смешанный и BIVAL (постоянный объем) [6, 9, 13]. У каждого из этих методов есть свои преимущества и недостатки [9, 20]. На рисунке 1 показана схема основного оросительного канала, управляемого датчиком по верхнему бьефу сооружений [29].



ДУ – датчик уровня воды; ПС – перегораживающее сооружение; $a(t)$ – величина открытия затвора; $Z(t)$ – уровень воды; $Q(t)$ – расход в верхнем бьефе перед сооружением; $q(t)$ – боковой отбор; $H(t)$ – глубина воды перед сооружением каждого i -го участка канала соответственно

Рисунок 1 – Схема магистрального оросительного канала

Обычно управляемыми переменными являются величины открытия затворов, приращения величин открытия затворов, скорость потока или увеличение расхода [27]. В качестве математических зависимостей для расчета управляющих воздействий на затворы перегораживающих сооружений рассматриваются законы регулирования дискретного действия [23].

Для стабилизации глубины (уровня) воды в верхнем бьефе на заданной уставке $H_{\text{ББ}}^{\text{уст}}$ используются дискретный (импульсный) и пропорциональный законы регулирования.

1 Дискретный (импульсный):

$$a(t_k) = \begin{cases} a(t_k + \nabla T), & \text{если } |\varepsilon(t_k)| \leq \varepsilon \\ a(t_k + \nabla T) - \nabla a, & \text{если } \varepsilon(t_k) > \varepsilon \\ a(t_k + \nabla T) + \nabla a, & \text{если } \varepsilon(t_k) < -\varepsilon \end{cases} .$$

2 Пропорциональный:

$$a(t_k) = \begin{cases} a(t_k + \nabla T), & \text{если } |\varepsilon(t_k)| \leq \varepsilon \\ a(t_k + \nabla T) + p_{\text{ВБ}}\varepsilon(t_k), & \text{если } \varepsilon(t_k) > \varepsilon \end{cases} ,$$

где $\nabla T = N_k \nabla t$ – время, характеризующее периодичность контроля и управления затвором; если период контроля $N_k = 1$, управление осуществляется на каждой характеристике с временным слоем ∇t , с;

$\varepsilon(t_k) = H_{\text{ВБ}}^{\text{уст}}(t) - H_{\text{ВБ}}(t)$ – отклонение регулируемого параметра глубины (уровня) воды a в верхнем бьефе от заданной уставки в момент времени t_k , м;

ε – заданная точность регулирования или зона нечувствительности регулируемого параметра, м;

∇a – заданный шаг открытия затвора, м;

$p_{\text{ВБ}}$ – заданный коэффициент усиления по пропорциональной составляющей.

Величины открытия затворов или их приращения позволяют учесть сложную динамику затворов, а также уровни воды до и после них [6, 9]. Расходы позволяют разделить систему на подсистемы, что важно при использовании однопараметрических локальных контроллеров, но в этом случае динамика затворов не учитывается, поэтому общая производительность системы не гарантируется [14].

Работы по автоматизации распределения воды в магистральных оросительных каналах в начале 1950-х гг. характеризовались использованием затворов с гидравлическим приводом [6], которые до сих пор применяются в различных каналах, несмотря на их низкую эффективность [9]. Пропорционально-интегрально-дифференцирующие (ПИД) регуляторы были и остаются наиболее широко используемыми и расширенными в управлении рас-

пределением воды в оросительных магистральных каналах [6, 9, 16, 18, 28]. Однако, когда имеют место процессы сложного динамического поведения, производительность ПИД-регуляторов является недостаточной [30, 31], поскольку в результате не реализуется эффективное управление распределением воды [6, 27]. В дальнейшем были предложены и разработаны другие классы драйверов, чтобы попытаться решить эту проблему динамического управления.

Для управления процессами со значительной временной задержкой, что является характерным для больших магистральных каналов оросительных систем, одним из наиболее часто используемых контроллеров является предсказатель Смита и его различные модификации [32–34]. Основное преимущество этого контроллера в том, что он исключает запаздывание характеристического уравнения замкнутой системы управления, т. е. исключает процесс с запаздыванием времени контура управления [35]. Таким образом, проблема проектирования и анализа автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) с временной задержкой решается так, как если бы такой задержки не было. Следовательно, контроллер Смита на основе предикторов был предложен для управления распределением воды в магистральных оросительных каналах [6, 36]. Однако хорошо известно, что некоторые ошибки моделирования могут вызвать нестабильность в системах управления на основе предсказателя Смита, если контроллер неправильно спроектирован [36]. Кроме того, производительность этого класса контроллеров с учетом воздействия измеримых и неизмеримых экстремальных значений, а также динамических неопределенностей недостаточна [37].

В некоторых случаях также предлагалось использовать централизованное управление распределением воды в магистральных оросительных каналах на базе персонального компьютера (ПК) [16, 38]. Однако результаты, полученные от применения этого типа стратегии управления в разных

каналах, не были удовлетворительными из-за сложного динамического поведения оросительных каналов и низкой надежности упомянутой стратегии управления.

Оптимальное управление, разработанное во второй половине XX в. и применяемое в основном для управления кораблем [39], было предложено для управления водораспределением в оросительных каналах [40]. Эта стратегия управления обычно требует модели процесса в переменных состояниях, полученных аналитически или путем идентификации системы [41]. Используемая обратная связь требует применения средства оценки состояния (фильтра Калмана) для получения оцененных состояний, подлежащих контролю [39]. Однако из-за серьезных динамических трудностей, создаваемых оросительными каналами, результаты, полученные при применении этой стратегии управления водораспределением, не были удовлетворительными. Исследования, проведенные некоторыми учеными, показали, что динамические параметры разных каналов ирригационных сетей изменяются, когда их расход меняется в рабочем интервале от минимального до максимального значений или изменяются аналогичным образом другие гидравлические параметры [18]. Этот класс каналов известен как каналы с изменяющимися во времени динамическими параметрами [18]. Следовательно, любой разработанный контроллер должен быть адаптирован или вести себя устойчиво в условиях такого рода вариаций.

Адаптивное управление, разработанное во второй половине XX в. [42, 43], было предложено для управления распределением воды в оросительных каналах [44, 45]. Однако из-за динамической сложности оросительных каналов достигнутые результаты не всегда были удовлетворительными. Для управления распределением воды в магистральных оросительных каналах также были предложены предсказательные контроллеры на основе моделей (ПКОМ) [46]. Эти драйверы основаны на использовании внутренней динамической модели процесса распределения воды

(обычно линейной) для прогнозирования значений на выходе процесса в будущие моменты времени, а также при расчете будущих управляющих сигналов с минимизацией определенного критерия J , чтобы процесс оставался как можно ближе к пути внутреннего состояния [46]. Этот критерий, как правило, считает квадратичную функцию ошибки между выходом предсказанного моделью и эталонной траекторией внутреннего процесса, а также включает в себя усилие управляющего воздействия. Однако явное решение может быть получено только при квадратичном критерии, а модель линейная, в противном случае необходимо использовать численные методы для нахождения решения [47]. Кроме того, когда процессы демонстрируют динамическое поведение, которое меняется со временем, внутренняя модель не может дать точных прогнозов, что приводит к значительному ухудшению результативности ПКОМ. С другой стороны, практическая реализация ПКОМ очень сложна, потому что управляющий сигнал получается через выполнение алгоритма оптимизации, во многих случаях с ограничениями [47], также требует высокой подготовки службы эксплуатации, что ограничивает его применение на оросительных каналах.

Устойчивость долгое время была характеристикой, не считавшейся неотъемлемой частью, которую нужно учитывать при проектировании регуляторов распределения воды в оросительных каналах, ввиду сложности математической формулировки [6]. Для управления водораспределением в оросительных каналах также были предложены контроллеры H_∞ [48, 49], которые позволяют включить требования к устойчивости, затуханию, к возмущениям и динамическим неопределенностям, а также улучшение характеристики драйверов [50]. Из сложностей практического применения можно отметить математическую сложность конструкции этого класса контроллеров, необходимость построения достаточно адекватных математических моделей распределения воды, а также высокую квалификацию эксплуатационных служб.

В последние годы в результате лучшего понимания дробного исчисления и вывода на рынок новых электронных схем, известных как фракталы, были применены операторы дробного порядка с удовлетворительными результатами при моделировании и управлении процессами со сложным динамическим поведением, среди которых процессы с распределенными параметрами [51]. Дробное исчисление представляет собой раздел математики, который включает производные и интегралы нецелого (произвольного) порядка и является обобщением понятий стандартных дифференцирования и интегрирования [51]. В последнее время для контроля распределения воды в магистральных каналах некоторые исследователи предложили использовать контроллеры дробного порядка, известные как $PI^\alpha D^\lambda$, где α и λ составляют необязательно целые порядки операторов интегрирования и вывода [52]. Одним из преимуществ этого класса контроллеров является то, что они позволяют проектировать системы с надежным управлением процессами, динамические параметры которых имеют широкий диапазон изменений, или процессами, подверженными большим помехам, достигая лучшей производительности систем управления и, следовательно, минимизируя потери воды при эксплуатации [51]. Однако из-за использования операторов дробного порядка практическая реализация этого класса контроллеров более сложна и требует большего знания эксплуатации, как, например, управление каналами с насосными станциями с разными отметками в разных бьефах [53]. Однако в настоящее время эффективное управление распределением воды в этом классе каналов представляет собой одну из важных комплексных задач международного научного сообщества в связи с острой необходимостью рационально использовать не только воду, но и энергию.

Также была разработана теория управления водораспределением на террасах и плоских рисовых системах [54]. Однако следует отметить, что это звено в ирригационных системах имеет самый низкий уровень ав-

томатизации во всем мире из-за технических трудностей, сопряженных с такими террасами, связанных с установкой датчиков и контроллеров. Поэтому эффективное управление водораспределением в рисовых системах представляет собой одну из серьезных проблем эффективного управления водными ресурсами.

Выводы. В исследовании представлен обзор различных стратегий, разработанных для управления водораспределением в магистральных каналах оросительных систем, которые представляют собой реальное решение проблем, связанных с нехваткой оросительной воды. Проведенный анализ состояния современных систем управления распределением воды в оросительных системах показывает, что до сих пор остаются нерешенными проблемы как теоретического, так и практического характера, которые делают невозможным получение высокой эффективности в управлении этим классом процессов, несмотря на большое количество проведенных исследований. Кроме того, значительная часть предложенных стратегий управления водораспределением не была реализована на практике и, как следствие, их эффективность не доказана. Поэтому проведение новых исследований, направленных на повышение производительности контроллеров, используемых в настоящее время в системах орошения сельскохозяйственных культур, представляет собой серьезный вызов для научного сообщества.

Список источников

1. Данилов-Данильян В. И., Хранович И. Л. Управление водными ресурсами. Согласование стратегий водопользования / Рос. акад. наук, Ин-т вод. проблем. М.: Науч. мир, 2010. 229 с.
2. Improving water resources management using different irrigation strategies and water qualities: field and modelling study / M. Afzal, A. Battilani, D. Solimando, R. Ragab // *Agricultural Water Management*. 2016. Vol. 1. P. 40–54. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.05.005>.
3. Дубенок Н. Н., Майер А. В. Разработка систем комбинированного орошения для полива сельскохозяйственных культур // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2018. № 1(49). С. 9–19.
4. Волков Л. Н. Значение воды в решении мировой продовольственной проблемы (Швеция) // *Экономика сельского хозяйства. Реферативный журнал*. 2009. № 4. С. 772.

5. The World's Water. Vol. 7. The Biennial Report on Freshwater Resources / P. H. Gleick, L. Allen, J. Christian-Smith, M. J. Cohen, H. Cooley, M. Heberger, J. Morrison, M. Palaniappan, P. Schulte. Washington DC: Island Press, 2011. 422 p.

6. Коваленко П. И. Автоматизация мелиоративных систем. М.: Колос, 1983. 304 с.

7. Айдаров И. П. Проблемы мелиорации земель и водопользования // Природо-обустройство. 2008. № 2. С. 5–19.

8. Косиченко Ю. М. Исследования фильтрационных потерь из каналов оросительных систем // Мелиорация и водное хозяйство. 2006. № 6. С. 24–25.

9. Litrico X., Fromion V. Modeling and control of hydrosystems [Electronic resource]. London: Springer-Verlag, 2009. 336 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-84882-624-3> (date of access: 07.02.2021).

10. Щедрин В. Н., Балакай Г. Т., Васильев С. М. Концептуальное обоснование разработки стратегии научно-технического обеспечения развития мелиорации земель в России // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2016. № 4(24). С. 1–21. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1110> (дата обращения: 07.02.2021).

11. Ткачев А. А. Расчет переходных процессов в бьефах магистрального канала при различных схемах регулирования для способа активного управления водораспределением // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2011. № 3(161). С. 86–90.

12. Ольгаренко И. В. Оценка качества планирования и реализации водопользования на оросительных системах // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2009. № 4. С. 35–37.

13. Ткачев А. А. Совершенствование процессов управления водораспределением на оросительной сети // Приволжский научный журнал. 2011. № 4(20). С. 187–191.

14. Моделирование динамического управления водораспределением на каналах открытой оросительной сети / В. Н. Щедрин, А. А. Чураев, В. М. Школьная, Л. В. Юченко // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2015. № 4(20). С. 1–20. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=819> (дата обращения: 07.02.2021).

15. Ольгаренко В. И., Ольгаренко Г. В., Ольгаренко И. В. Оптимизация процессов водопользования на основе методологии ландшафтно-экологического подхода. Новочеркасск: Лик, 2019. 623 с.

16. Developing a centralized automatic control system to increase flexibility of water delivery within predictable and unpredictable irrigation water demands / S. M. Hashemy Shahdany, S. Taghvaeian, J. M. Maestre, A. R. Firoozfar // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. Vol. 163. 104862. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104862>.

17. García Villanueva N. H. Operación de canales: conceptos generales [Electronic resource] / Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México, 2015. 313 p. URL: https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/riego-drenaje/operacion-canales.pdf (date of access: 07.02.2021).

18. Automatic tuning of PI controllers for an irrigation canal pool / X. Litrico, P. O. Malaterre, J. P. Baume, P. Y. Vion, J. Ribot Bruno // Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 2007. Vol. 133(1). P. 27–37.

19. Ogata K. Modern Control Engineering. 5th ed. New Jersey: Pearson Education, 2010. 912 p.

20. Chow V. T. Open-Channel Hydraulics. New Jersey: The Blackburn Press, 2015. 700 p.

21. On modeling and constrained model predictive control of open irrigation canals / L. Cen, Z. Wu, X. Chen, Y. Zou, S. Zhang // Journal of Control Science and Engineering. 2017. Article ID: 6257074. <https://doi.org/10.1155/2017/6257074>.

22. On the modelling and control of a laboratory prototype of a hydraulic canal based on a TITO fractional-order model / A. San-Millan, D. Feliu-Talegón, V. Feliu-Batlle, R. Rivas-Perez // *Entropy*. 2017. Vol. 19. P. 401. <https://doi.org/10.3390/e19080401>.

23. Иваненко Ю. Г., Ткачев А. А. Теоретические и прикладные проблемы гидравлики рек и каналов. Новочеркасск, 2007. 249 с.

24. Tangirala A. K. Principles of system identification: Theory and practice. NY, USA: CRC Press, 2015. 908 p.

25. Гроп Д. Методы идентификации систем / пер. с англ. В. А. Васильева, В. И. Лопатина; под ред. Е. И. Кринецкого. М.: Мир, 1979. 302 с.

26. Van Overloop P. Model predictive control on open water systems. The Netherlands: IOS Press Inc, 2006. 182 p.

27. Clemmens A. Canal automation // *Resource Magazine*. 2006. Vol. 13(1). P. 7–8.

28. Rogers D., Goussard J. Canal control algorithms currently in use // *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 1998. Vol. 124(1). P. 11–25. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1998\)124:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1998)124:1(11)).

29. Integrator delay zero model for design of upstream water-level controllers / A. J. Clemmens, X. Tian, P. J. van Overloop, X. Litrico // *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2017. Vol. 143(3). 0000997. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000997](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000997).

30. Visioli A. Practical PID Control. London: Springer-Verlag, 2006. 310 p. DOI: 10.1007/1-84628-586-0.

31. Vilanova R., Alfaro V. Control PID robusto: Una visión panorámica // *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. 2011. № 8. P. 141–158. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2011.06.003>.

32. Kao T. G., Nguen M., Rivas-Perez R. Adaptive control of a time-delay plant using a searchless model-reference self-tuning system // *Automation and Remote Control*. 1989. Vol. 49 (12, pt. 2). P. 1620–1627.

33. Åström K. J., Hang C. C., Lim B. C. A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead time // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1994. Vol. 39(2). P. 343–345.

34. Normey-Rico J. E., Camacho E. F. Dead-time compensators: A survey // *Control Engineering Practice*. 2008. Vol. 16. P. 407–428. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2007.05.006>.

35. Normey-Rico J. E., Camacho E. F. Control of Dead-time Processes. Berlin: Springer, 2007. 462 p. DOI: 10.1007/978-1-84628-829-6.

36. Bolea Y., Puig V., Blesa J. Gain-scheduled Smith predictor PID-based LPV controller for open-flow canal control // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2014. Vol. 22(2). P. 468–477. DOI: 10.1109/TCST.2013.2257776.

37. Sanz R., García P., Albertos P. A generalized Smith predictor for unstable time-delay SISO systems // *ISA Transactions*. 2018. Vol. 72. P. 197–204. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2017.09.020>.

38. Montazar A., Van Overloop P., Brouwer J. Centralized controller for the Narmada main canal // *Irrigation and Drainage*. 2005. Vol. 54(1). P. 79–89. <https://doi.org/10.1002/ird.155>.

39. Optimal Control / L. T. Aschepkov, D. V. Dolgy, T. Kim, R. P. Agarwal. Berlin: Springer, 2017. 209 p. DOI: 10.1007/978-3-319-49781-5.

40. Карамбилов С. Н., Трикозюк С. А. Многорежимная стохастическая оптимизация систем подачи и распределения воды // *Природообустройство*. 2008. № 5. С. 63–69.

41. Corrigan G., Sanna S., Usai G. Sub-optimal constant-volume control for open channel networks // *Applied Mathematical Modelling*. 1983. № 7. P. 262–267. [https://doi.org/10.1016/0307-904X\(83\)90079-3](https://doi.org/10.1016/0307-904X(83)90079-3).

42. Фомин В. Н., Фрадков А. Л., Якубович В. А. Адаптивное управление динамическими объектами. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. 448 с.

43. Åström K. J., Wittenmark B. Adaptive Control. 2nd ed. NY, USA: Addison-Wesley, 1995. 573 p.

44. Cao T. G., Rivas-Perez R., Pichuguin E. D. Stability analysis of control system by variable width pulses of water levels in irrigation main canals // *Problems of Rational Water Use in Land Reclamation Systems*. 1983. P. 91–98.

45. Sawadogo S. R., Faye M., Mora-Camino F. Decentralized adaptive predictive control of multireach irrigation canal // *International Journal of Systems Science*. 2001. Vol. 32(10). P. 1287–1296. <https://doi.org/10.1080/00207720110052049>.

46. Bolea Y., Puig V. Gain-scheduling multivariable LPV control of an irrigation canal system // *ISA Transactions*. 2016. Vol. 63. P. 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2016.03.009>.

47. Xi Y., Li D. *Predictive Control. Fundamentals and Developments*. Singapore: John Wiley & Sons, 2019. 392 p.

48. Litrico X., Fromion V. H_∞ control of an irrigation canal pool with a mixed control politics // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2006. Vol. 14(1). P. 99–111. DOI: 10.1109/TCST.2005.860526.

49. Fromion V., Baume J. P. Canal controller design. A multivariable approach using H_∞ // *The European Control Conference*. Porto, Portugal, 2001. P. 3398–3403.

50. Liu K. Z., Ya Y. *Robust Control. Theory and Applications*. Singapore: John Wiley & Sons, 2019. 500 p.

51. *Fractional-order Systems and Controls. Fundamentals and Applications* / C. A. Monje, Y. Chen, B. M. Vinagre, D. Xue, V. Feliu-Batlle. London: Springer-Verlag, 2010. 415 p. DOI: 10.1007/978-1-84996-335-0.

52. Time domain tuning of a fractional order PI_α controller combined with a Smith predictor for automation of water distribution in irrigation main channel pools / F. J. Castillo-Garcia, V. Feliu-Batlle, R. Rivas-Perez, L. Sanchez-Rodriguez // *IFAC Proceedings Volumes*. 2011. Vol. 44(1). P. 15049–15054. <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.03138>.

53. Optimizing regional irrigation water allocation for multi-stage pumping-water irrigation system based on multi-level optimization-coordination model / Y. Jiang, L. Xiong, F. Yao, Z. Xu // *Journal of Hydrology*. 2019. № 4. 100038. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100038>.

54. Towards a smart automated surface irrigation management in rice-growing areas in Italy / D. Masseroni, J. Uddin, R. Tyrrell, I. M. Y. Mareels, C. Gandolfi, A. Facchi // *Journal of Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 47(585). P. 42–48. <https://doi.org/10.4081/jae.2017.585>.

References

1. Danilov-Danilyan V.I., Khranovich I.L., 2010. *Upravlenie vodnymi resursami. Soglasovanie strategiy vodopol'zovaniya* [Management of water resources. Coordination of Water Use Strategies]. Russian Academy of Sciences, Institute of Water Resources Problems. Moscow, Nauchny Mir Publ., 229 p. (In Russian).

2. Afzal M., Battilani A., Solimando D., Ragab R., 2016. Improving water resources management using different irrigation strategies and water qualities: field and modelling study. *Agricultural Water Management*, vol. 1, pp. 40-54, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.05.005>.

3. Dubenok N.N., Mayer A.V., 2018. *Razrabotka sistem kombinirovannogo orosheniya dlya poliva sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [Development of combined irrigation systems for irrigation of agricultural crops]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Bull. of Nizhnevolzhsky Agrouniversity Complex: Science and Higher Professional Education], no. 1(49), pp. 9-19. (In Russian).

4. Volkov L.N., 2009. *Znachenie vody v reshenii mirovoy prodovol'stvennoy problemy (Shvetsiya)* [The value of water in solving the global food problem (Sweden)]. *Ekonomika sel'skogo khozyaystva. Referativnyy zhurnal* [Agricultural Economics. Abstract Journal], no. 4, p. 772. (In Russian).

5. Gleick P.H., Allen L., Christian-Smith J., Cohen M.J., Cooley H., Heberger M.,

Morrison J., Palaniappan M., Schulte P., 2011. *The World's Water. Vol. 7. The Biennial Report on Freshwater Resources*. Washington DC, Island Press, 422 p.

6. Kovalenko P.I., 1983. *Avtomatizatsiya meliorativnykh system* [Automation of Reclamation System]. Moscow, Kolos Publ., 304 p. (In Russian).

7. Aydarov I.P., 2008. *Problemy melioratsii zemel' i vodopol'zovaniya* [Problems of land reclamation and water use]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 2, pp. 5-19. (In Russian).

8. Kosichenko Yu.M., 2006. *Issledovaniya fil'tracionnykh poter' iz kanalov orositel'nykh sistem* [Research of filtration losses from canals of irrigation systems]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Irrigation and Water Management], no. 6, pp. 24-25. (In Russian).

9. Litrico X., Fromion V., 2009. *Modeling and control of hydrosystems* [Electronic resource]. London, Springer-Verlag Publ., 336 p., available: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-84882-624-3> (date of access: 02.07.2021).

10. Shchedrin V.N., Balakay G.T., Vasiliev S.M., 2016. [Conceptual justification of strategy development for scientific and technological support of land reclamation development in Russia]. *Nauchnyy Zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii*, no. 4(24), pp. 1-21, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1110> (date of access: 02.07.2021). (In Russian).

11. Tkachev A.A., 2011. *Raschet perekhodnykh protsessov v b'efakh magistral'nogo kanala pri razlichnykh skhemakh regulirovaniya dlya sposoba aktivnogo upravleniya vodoraspredeleнием* [Calculation of transient processes in the headwaters of the main canal under different schemes for the regulation of the method of active water distribution control]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Bull. of Higher Educational Institutions. North Caucasian region. Technical Science], no. 3(161), pp. 86-90. (In Russian).

12. Olgarenko I.V., 2009. *Otsenka kachestva planirovaniya i realizatsii vodopol'zovaniya na orositel'nykh sistemakh* [Assessment of the quality of planning and realization in water management of irrigation systems]. *Vestnik Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk* [Bull. of the Russian Academy of Agricultural Sciences], no. 4, pp. 35-37. (In Russian).

13. Tkachev A.A., 2011. *Sovershenstvovanie protsessov upravleniya vodoraspredeleнием na orositel'noy seti* [Improvement of water distribution management processes on the irrigation network]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal* [Privolzhskiy Scientific Journal], no. 4(20), pp. 187-191. (In Russian).

14. Shchedrin V.N., Churaev A.A., Shkolnaya V.M., Yuchenko L.V., 2015. [Modeling of dynamic control of water distribution on canals of an open irrigation network]. *Nauchnyy Zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii*, no. 4(20), pp. 1-20, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=819> (date of access: 02.07.2021). (In Russian).

15. Olgarenko V.I., Olgarenko G.V., Olgarenko I.V., 2019. *Optimizatsiya protsessov vodopol'zovaniya na osnove metodologii landshaftno-ekologicheskogo podkhoda* [Optimization of water use processes based on the landscape-ecological approach methodology]. Novocherkassk, Lik Publ., 623 p. (In Russian).

16. Hashemy Shahdany S.M., Taghvaeian S., Maestre J.M., Firoozfar A.R., 2019. Developing a centralized automatic control system to increase flexibility of water delivery within predictable and unpredictable irrigation water demands. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 163, 104862, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104862>.

17. García Villanueva N.H., 2015. *Operación de canales: conceptos generales*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México, 313 p., available: https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/riego-drenaje/operacion-canales.pdf (date of access: 07.02.2021). (In Spanish).

18. Litrico X., Malaterre P.O., Baume J.P., Vion P.Y., Ribot Bruno J., 2007. Automatic tuning of PI controllers for an irrigation canal pool. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 133(1), pp. 27-37.

19. Ogata K., 2010. *Modern Control Engineering*. 5th ed. New Jersey, Pearson Education, 912 p.
20. Chow V.T., 2015. *Open-Channel Hydraulics*. New Jersey, The Blackburn Press, 700 p.
21. Cen L., Wu Z., Chen X., Zou Y., Zhang S., 2017. On modeling and constrained model predictive control of open irrigation canals. *Journal of Control Science and Engineering*, article ID: 6257074, <https://doi.org/10.1155/2017/6257074>.
22. San-Millan A., Feliu-Talegón D., Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., 2017. On the modelling and control of a laboratory prototype of a hydraulic canal based on a TITO fractional-order model. *Entropy*, vol. 19, p. 401, <https://doi.org/10.3390/e19080401>.
23. Ivanenko Yu.G., Tkachev A.A., 2007. *Teoreticheskie i prikladnye problemy gidravliki rek i kanalov* [Theoretical and Applied Problems of Hydraulics of Rivers and Canals]. Novocherkassk, 249 p. (In Russian).
24. Tangirala A.K., 2015. *Principles of system identification: Theory and Practice*. NY, USA, CRC Press, 908 p.
25. Grope D., 1979. *Metody identifikatsii sistem* [Methods of Identification of Systems]. Translated by Vasil'ev V.A., Lopatin V.I. Moscow, Mir Publ., 302 p. (In Russian).
26. Van Overloop P., 2006. *Model predictive control on open water systems*. The Netherlands, IOS Press Inc, 182 p.
27. Clemmens A., 2006. Canal automation. *Resource Magazine*, vol. 13(1), pp. 7-8.
28. Rogers D., Goussard J., 1998. Canal control algorithms currently in use. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 124(1), pp. 11-25, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1998\)124:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1998)124:1(11)).
29. Clemmens A.J., Tian X., Van Overloop P.J., Litrico X., 2017. Integrator delay zero model for design of upstream water-level controllers. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 143(3), 0000997, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000997](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000997).
30. Visioli A., 2006. *Practical PID Control*. London, Springer-Verlag Publ., 310 p., DOI: 10.1007/1-84628-586-0.
31. Vilanova R., Alfaro V., 2011. Control PID robusto: Una visión panorámica. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, no. 8, pp. 141-158, <https://doi.org/10.1016/j.riai.2011.06.003>. (In Spanish).
32. Kao T.G., Nguen M., Rivas-Perez R., 1989. Adaptive control of a time-delay plant using a searchless model-reference self-tuning system. *Automation and Remote Control*, vol. 49 (12, pt. 2), pp. 1620-1627.
33. Åström K.J., Hang C.C., Lim B.C., 1994. A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead time. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 39(2), pp. 343-345.
34. Normey-Rico J.E., Camacho E.F., 2008. Dead-time compensators: A survey. *Control Engineering Practice*, vol. 16, pp. 407-428, <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2007.05.006>.
35. Normey-Rico J.E., Camacho E.F., 2007. *Control of Dead-time Processes*. Berlin, Springer, 462 p., DOI: 10.1007/978-1-84628-829-6.
36. Bolea Y., Puig V., Blesa J., 2014. Gain-scheduled Smith predictor PID-based LPV controller for open-flow canal control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 22(2), pp. 468-477, DOI: 10.1109/TCST.2013.2257776.
37. Sanz R., García P., Albertos P., 2018. A generalized Smith predictor for unstable time-delay SISO systems. *ISA Transactions*, vol. 72, pp. 197-204, <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2017.09.020>.
38. Montazar A., Van Overloop P., Brouwer J., 2005. Centralized controller for the Narmada main canal. *Irrigation and Drainage*, vol. 54(1), pp. 79-89, <https://doi.org/10.1002/ird.155>.
39. Aschepkov L.T., Dolgy D.V., Kim T., Agarwal R.P., 2017. *Optimal Control*. Berlin, Springer, 209 p., DOI: 10.1007/978-3-319-49781-5.

40. Karambirov S.N., Trikozyuk S.A., 2008. *Mnogorezhimnaya stokhasticheskaya optimizatsiya sistem podachi i raspredeleniya vody* [Multi-mode stochastic optimization of water supply and distribution systems]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 5, pp. 63-69. (In Russian).

41. Corrigan G., Sanna S., Usai G., 1983. Sub-optimal constant-volume control for open channel networks. *Applied Mathematical Modelling*, no. 7, pp. 262-267, [https://doi.org/10.1016/0307-904X\(83\)90079-3](https://doi.org/10.1016/0307-904X(83)90079-3).

42. Fomin V.N., Fradkov A.L., Yakubovich V.A., 1981. *Adaptivnoye upravleniye dinamicheskimi ob'yektami* [Adaptive Control of Dynamic Objects]. Moscow, Nauka, Main Editorial Office of Physical and Mathematical Literature, 448 p. (In Russian).

43. Astrom K.J., Wittenmark B., 1995. *Adaptive Control*. 2nd ed. NY, USA, Addison-Wesley, 573 p.

44. Cao T.G., Rivas-Perez R., Pichuguin E.D., 1983. Stability analysis of control system by variable width pulses of water levels in irrigation main canals. *Problems of Rational Water Use in Land Reclamation Systems*, pp. 91-98.

45. Sawadogo S.R., Faye M., Mora-Camino F., 2001. Decentralized adaptive predictive control of multireach irrigation canal. *International Journal of Systems Science*, vol. 32(10), pp. 1287-1296, <https://doi.org/10.1080/00207720110052049>.

46. Bolea Y., Puig V., 2016. Gain-scheduling multivariable LPV control of an irrigation canal system. *ISA Transactions*, vol. 63, pp. 274-280, <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2016.03.009>.

47. Xi Y., Li D., 2019. *Predictive Control. Fundamentals and Developments*. Singapore, John Wiley & Sons Publ., 392 p.

48. Litrico X., Fromion V., 2006. H_∞ control of an irrigation canal pool with a mixed control politics. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 14(1), pp. 99-111, DOI: 10.1109/TCST.2005.860526.

49. Fromion V., Baume J.P., 2001. Canal controller design. A multivariable approach using H_∞ . *The European Control Conference*. Porto, Portugal, pp. 3398-3403.

50. Liu K.Z., Ya Y., 2019. *Robust Control. Theory and Applications*. Singapore, John Wiley & Sons Publ., 500 p.

51. Monje C.A., Chen Y., Vinagre B.M., Xue D., Feliu-Batlle V., 2010. *Fractional-order Systems and Controls. Fundamentals and Applications*. London, Springer-Verlag Publ., 415 p., DOI: 10.1007/978-1-84996-335-0.

52. Castillo-Garcia F.J., Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., Sanchez-Rodriguez L., 2011. Time domain tuning of a fractional order PI_α controller combined with a Smith predictor for automation of water distribution in irrigation main channel pools. *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 44(1), pp. 15049-15054, <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.03138>.

53. Jiang Y., Xiong L., Yao F., Xu Z., 2019. Optimizing regional irrigation water allocation for multi-stage pumping-water irrigation system based on multi-level optimization-coordination model. *Journal of Hydrology*, no. 4, 100038, <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100038>.

54. Masseroni D., Uddin J., Tyrrell R., Mareels I.M.Y., Gandolfi C., Facchi A., 2017. Towards a smart automated surface irrigation management in rice-growing areas in Italy. *Journal of Agricultural Engineering*, vol. 47(585), pp. 42-48, <https://doi.org/10.4081/jae.2017.585>.

Информация об авторах

А. А. Ткачев – заведующий кафедрой гидротехнического строительства, доктор технических наук, доцент;

И. В. Ольгаренко – заведующий кафедрой мелиорации земель, доктор технических наук, доцент.

Information about the authors

A. A. Tkachyev – Head of the Department of Hydraulic Engineering, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor;

I. V. Olgarenko – Head of the Department of Land Reclamation, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.01.2021; одобрена после рецензирования 17.03.2021; принята к публикации 31.03.2021.

The article was submitted 26.01.2021; approved after reviewing 17.03.2021; accepted for publication 31.03.2021.