

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.31

doi: 10.31774/2712-9357-2022-12-4-169-185

Использование теории графов при формировании оптимальных комплексов мелиоративных каналоочистительных машин

Хамзат Арсланбекович Абдулмажидов¹, Виктор Иванович Балабанов²,
Наталья Борисовна Мартынова³

^{1,2,3}Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

¹Hamzat72@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7699-4799>

²vbalabanov@rgau-msha.ru

³nmartinova@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5282-5835>

Аннотация. Цель: рассмотрение принципов, заложенных в теории графов, для решения задач по формированию оптимальных комплексов машин для очистки и восстановления мелиоративных каналов. **Материалы и методы.** Для формирования оптимального комплекса машин по очистке мелиоративных каналов использованы материалы, полученные при исследованиях состояния элементов как оросительной, так и осушительной сети мелиоративных систем, требующих последовательного выполнения технологических операций. Для выбора оптимального комплекса каналоочистительных машин из перечня существующих или новых использованы элементы теории графов и алгоритм Дейкстры. **Результаты.** Наличие большого количества разнообразных типов и типоразмеров каналоочистителей позволяет решать проблемы, связанные с удалением наносов, заилений и растительности из каналов. Однако с экономической точки зрения чем больше машин содержится в одном комплексе, тем дороже обходится работа по очистке каналов. В то же время не существует комплексов машин, содержащих минимум машин (одну или две), способных выполнить все операции по очистке и восстановлению каналов мелиоративных систем. С учетом того, что каналы могут быть как с закрепленным дном, так и без его крепления, очистку можно проводить с помощью каналоочистителя с ковшом на жестких направляющих. Для первого случая целесообразно применять ковш прямоугольного профиля, а для второго – трапециoidalного профиля. Такая конструкция позволяет обеспечивать проектные размеры дна и прилежащих ко дну откосов каналов. **Выводы.** Задачу по формированию оптимального состава комплекса машин исходя из их технико-эксплуатационных и технико-экономических показателей позволяет решать теория графов. Наиболее часто используемый в нахождении кратчайших путей в логистике алгоритм Дейкстры применим при решении задач по очистке каналов каналоочистительными комплексами с наименьшими затратами.

Ключевые слова: мелиоративные каналы, очистка каналов, каналоочистительные комплексы, формирование комплексов каналоочистителей, применение теории графов, каналоочиститель с ковшом на жестких направляющих

Для цитирования: Абдулмажидов Х. А., Балабанов В. И., Мартынова Н. Б. Использование теории графов при формировании оптимальных комплексов мелиоративных каналоочистительных машин // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12, № 4. С. 169–185. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-4-169-185>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

The graph theory use in the formation of optimal complexes of reclamation canal cleaners

Khamzat A. Abdulmazhidov¹, Victor I. Balabanov², Natalia B. Martynova³

^{1, 2, 3}Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

¹Hamzat72@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7699-4799>

²vbalabanov@rgau-msha.ru

³nmartynova@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5282-5835>

Abstract. Purpose: to consider the principles laid down in the graph theory for solving problems on formation of optimal complexes of machines for cleaning and restoring reclamation canals. **Materials and methods.** To form an optimal complex of machines for cleaning reclamation canals, materials that were obtained during studies of the state of the elements of both the irrigation and drainage networks of reclamation systems, which require sequential implementation of technological operations were used. To select the optimal set of canal cleaning machines from the list of existing or new ones, elements of graph theory and Dijkstra's algorithm were used. **Results.** The presence of a large number of various types and sizes of canal cleaners helps to solve problems tied with the removal of sediment, silting and vegetation from canals. However, from an economic point of view, the more machines are in one complex, the more expensive it is to clean the canals. At the same time, there are no complexes of machines containing a minimum of machines (one or two) capable of performing all operations for cleaning and restoring the canals of reclamation systems. Taking into account the fact that the canals can be both with a fixed bottom and without its fixing, the cleaning can be carried out using a canal cleaner with a rigid guide bucket. For the first case, it is advisable to use a rectangular bucket, and for the second – a trapezoidal profile. Such a design makes it possible to provide the design dimensions of the bottom and the canal slopes adjacent to the bottom. **Conclusions.** The task of forming the optimal composition of a complex of machines based on their technical-operational and technical-economic indicators can be solved by graph theory. Dijkstra's algorithm, which is most often used in finding the shortest paths in logistics, is applicable to solving problems of cleaning canals with canal cleaning systems at the lowest cost.

Keywords: reclamation canals, canal cleaning, canal-clearing complexes, formation of canal-cleaner complexes, graph theory application, canal cleaner with a rigid guide bucket

For citation: Abdulmazhidov Kh. A., Balabanov V. I., Martynova N. B. The graph theory use in the formation of optimal complexes of reclamation canal cleaners. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2022;12(4):169–185. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-4-169-185>.

Введение. Обеспечение эффективной эксплуатации как осушительных, так и оросительных мелиоративных систем в значительной степени обусловлено оптимальным формированием состава комплексов каналоочистительных машин. Под комплексом каналоочистительных машин в данном контексте подразумевается группа машин различных типов и типоразме-

ров, предназначенных для последовательного и логического проведения всех операций по очистке и восстановлению проектных размеров и характеристик мелиоративных каналов. Максимальный эффект от проведения всех операций будет достигнут при минимальном составе комплекса, способного проводить все работы с минимальными затратами.

Формирование комплексов каналоочистительных машин напрямую связано с операциями по очистке и восстановлению каналов, в общем виде работа включает в себя следующие операции: очистка дна канала от наносов, заилений; очистка нижних частей откосов от наносов и растительности; окашивание верхних частей откосов; сбор наносов, заилений и растительности, вынутых из профиля канала, на его берме; погрузка в транспортные средства, транспортирование и утилизация наносов, заилений и растительности. В некоторых случаях допустимо распределение вынутых наносов и заилений вдоль канала между бермой и мелиорируемой территорией. Однако такое распределение возможно только после проведения химического анализа разрабатываемых грунтов и наносов, который покажет их безвредность для выращиваемых сельскохозяйственных культур.

Технологию и последовательность очистки мелиоративных каналов невозможно описать однофакторным исследованием, поэтому важно выбрать основные факторы, влияющие на эффективность работы системы, при многофакторном исследовании.

Начиная с 60-х и заканчивая 80-ми гг. прошлого столетия было спроектировано и выпущено серийно много различных типов и типоразмеров специальных каналоочистительных машин, однако в 90-е гг. их выпуск резко снизился. Такое состояние дел приводит к тому, что на очистных работах часто используются широко распространенные общестроительные экскаваторы. Некоторые виды работ, конечно, с некоторой модернизацией рабочих органов, можно проводить с помощью данных машин, но специальные операции, например очистка от наносов и заилений дна с закрепленными отко-

сами, становятся невозможными. Такие работы необходимо выполнять с помощью специальных каналоочистительных машин. Здесь на первое место выходят машины с рабочими органами, движущимися прямолинейно по оси канала. Такой машиной является каналоочиститель РР-303.

Определенное количество машин все же производится в Российской Федерации, также довольно эффективно функционируют заводы в Республике Беларусь. Например, Кохановский завод выпускает специальные каналоочистительные машины с боковой навеской рабочего оборудования на базе пневмоколесных тракторов МТЗ.

На первый взгляд, при формировании экономической оценки проектирования, модернизации и эксплуатации каналоочистительных машин на мелиоративных системах может сложиться мнение о том, что отсутствует экономический эффект от ведения таких работ и нет очевидного роста урожайности сельскохозяйственных культур на мелиорируемых землях.

Необходимость проведения очистки и поддержания в работоспособном состоянии мелиоративных каналов часто подтверждается различными катаклизмами. Примеры – пожары в Подмоскowie 2010 г., когда горели торфяники, или наводнения в определенных районах. Известно, что крупная компания МСМ-5 проводила дополнительное обводнение торфяников, стоимость госзаказа в 2011 г. могла составить, по данным открытых источников, 1,4 млрд руб. Здесь встает вопрос о необходимости применения известного метода двойного регулирования, т. е. в период засухи влагу на территориях необходимо сохранять (в т. ч. регулированием шлюзов на каналах), а в паводковый период воду нужно удалять, и в том, и в другом случае необходимы каналы.

Очевидно, что уход за каналами и проведение своевременного ремонта с использованием оптимальных комплексов позволят избежать таких больших расходов на восстановление систем и проведение строительных работ по устранению и предупреждению лесных пожаров в Подмоскowie.

В связи с вышеизложенным актуальной задачей становится формирование оптимального состава комплексов мелиоративных каналоочистителей для того или иного мелиоративного хозяйства, имеющего системы с различными видами каналов.

Материалы и методы. Такая задача может быть решена с помощью теории графов. Известно, что сетевые графы используются при решении транспортных и сложных логистических задач. Определенное подобие логистических задач представляет собой последовательное и логическое проведение операций по очистке каналов машинами различных типов и типоразмеров.

Одним из примеров использования графов является формирование оптимального по технико-эксплуатационным показателям комплекса машин для очистки каналов. Механизированные комплексы могут содержать различные типы и количество машин, которые позволяют формировать большое количество вариантов сочетания между собой типов и типоразмеров для очистки каналов различной длины и содержащих разные объемы наносов и заилений. Известно, что оптимальная эксплуатация каналоочистительных машин определяется качественным проведением очистных операций их рабочим оборудованием и его соответствием эксплуатационным характеристикам очищаемых каналов.

Представление задачи в виде сетевого графа существенно упрощает ее решение, поскольку существует множество алгоритмов оптимизации таких сетей. В реальности результаты работы мелиоративных хозяйств, располагающих механизированными комплексами, являются весомыми исходными данными для оценки эффективности эксплуатации различных возможных вариантов сочетания каналоочистительных машин и формирования рекомендаций по оптимальному применению определенного состава комплекса для очистки конкретного канала с определенными геометрическими размерами поперечного профиля, конкретным количеством наносов,

заилений и фиксированной протяженности. Все это требует также перехода от реального проведения работ к графическим алгоритмам.

Наиболее логичным решением задачи по выбору оптимального комплекса каналоочистительных машин будет применение метода, предусматривающего использование алгоритма Дейкстры. Несмотря на то, что данный алгоритм предназначен для нахождения кратчайшего пути в решении транспортной задачи, его можно применить для решения задачи выбора комплекса мелиоративных машин, которые будут выполнять операции по очистке каналов с наименьшими затратами.

Результаты и обсуждение. Системой машин для комплексной механизации сельскохозяйственного производства в части «Мелиорация» в конце 90-х гг. были сформированы технологические комплексы машин для производства эксплуатационных работ на мелиоративных системах, которые предусматривали 18 разнообразных механизированных комплексов, объединенных в пять групп: для ремонта и очистки каналов от наносов, в т. ч. обсаженных деревьями с одной или двух сторон; для окашивания и удаления растительности на каналах; для ремонта и промывки закрытого дренажа; для очистки отстойников и каналов способом гидромеханизации; для ремонта и содержания гидротехнических сооружений.

При разработке технологии и состава комплексов машин были учтены специфические условия проведения механизированных работ по очистке каналов: растянутость фронта работ при сравнительно малом их удельном объеме, неудобства проезда машин к месту работы (отсутствие дорог, наличие посадок деревьев), сложный профиль поперечного сечения каналов, изменение в процессе эксплуатации их трассы, небольшая толщина наносного слоя и др. [1]. В связи с вышеперечисленными факторами при очистке, окашивании оросительных и осушительных каналов и стабилизации их откосов, промывке и очистке закрытого дренажа в систему машин наряду с общестроительными машинами включены спе-

циальные машины-каналоочистители, дополнительное оборудование к одноковшовым экскаваторам ЭО-2621А, ЭО-3322Д, косилки, дренопромылочные машины и средства гидромеханизации. Современным аналогом экскаватора ЭО-3322Д является ЕК-14 [2, 3].

Основное внимание было обращено на внедрение высокопроизводительных специальных мелиоративных машин, обеспечивающих высокое качество работ, а также сокращение числа операций за счет их совмещения при меньшем количестве машин. Были учтены предложения ряда институтов о введении в систему новых для того времени и рекомендуемых к освоению или прошедших испытания и выпускаемых промышленностью технических средств. В технологических комплексах для ремонта и содержания каналов предусмотрено было использование таких машин, как каналоочиститель МР-14, вместо МР-17, МР-15 взамен ЭМ-152Б и МР-16, а также каналоочистителей на собственной базе типа МР-12А, внутриканального на базе погрузчика ТО-31 (глубина очистки до 4 м), на колесном тракторе тягового класса 1,4–2,0 со сменными рабочими органами, на базе универсального манипулятора ЭМ-3340 и др. В комплексах для окашивания и удаления растительности на каналах значительно была расширена номенклатура дополнительных технических средств, например, косилки-подборщики, дноокашивающие и фронтальные косилки, агрегат ремонтно-эксплуатационный. Все перечисленные машины выпускались в свое время, и лишь немногие из них все еще выпускаются, это, например, экскаваторы ЭО-2621, ЕК-14. Из числа новых машин, которые сейчас выпускаются, можно добавить каналоочиститель ОКН-0,5.

Различные комплексы, сформированные на основе перечисленных машин, позволяют создавать графы по тем или иным оптимизирующим параметрам [4–7]. На рисунке 1 представлен граф по выбору комплекса с наименьшими затратами для очистки канала протяженностью 1 км

из представленных трех возможных вариантов комплексов каналоочистительных машин.



Рисунок 1 – Граф по выбору комплекса машин с наименьшими затратами на проведение очистных работ из возможных вариантов

Figure 1 – Graph for choosing a complex of machines for clearing work cost-effectively from the possible options

Далее был проведен анализ технико-эксплуатационных характеристик машин, входящих в состав лучших и худших вариантов работы по критерию очистки канала протяженностью 1 км, а количество возможных комплексов доведено до четырех.

На рисунке 2 представлен граф с конкретными машинами того или иного комплекса и их технико-эксплуатационными характеристиками.

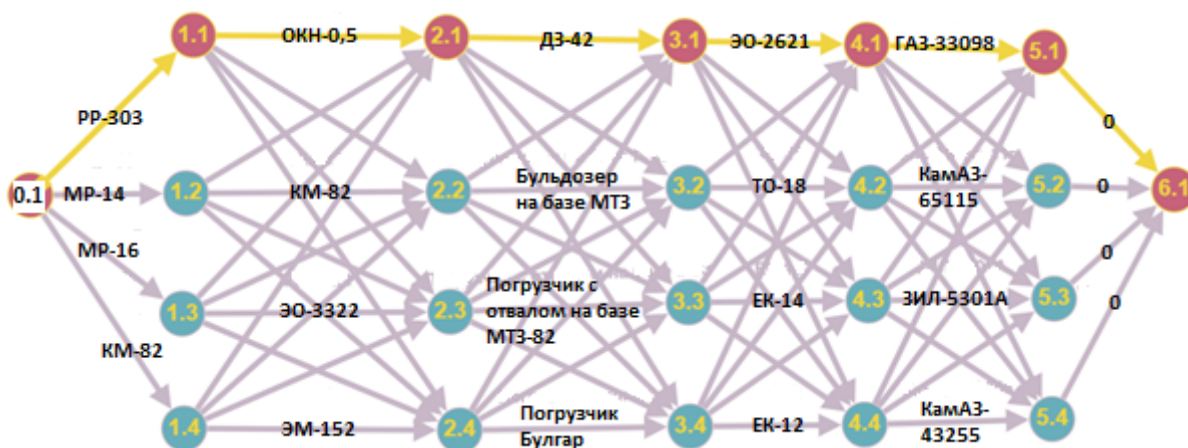


Рисунок 2 – Определение оптимального комплекса каналоочистительных машин из перечня возможных вариантов с помощью алгоритма Дейкстры

Figure 2 – Determination of the optimal complex of canal cleaning machines from the list of possible options using Dijkstra's algorithm

Граф сформирован с учетом того, что необходимо провести очистку участка канала протяженностью 1000 м. Начало работ – вершина 1, завершение – вершина 2. Для этой задачи можно использовать множество комплексов, однако в нашей работе мы используем четыре комплекса, которые содержат машины, наиболее соответствующие операциям очистки и восстановления канала. В первом варианте содержатся следующие машины: каналоочиститель РР-303 для очистки дна канала; каналоочиститель ОКН-0,5 для очистки откосов канала; бульдозер ДЗ-42 для сбора вынутых из канала наносов, заилений и растительности в кучи; экскаватор ЭО-2621 для погрузки наносов, заилений и растительности в самосвал; самосвал ГАЗ-33098 для транспортировки наносов к месту утилизации. Данный комплекс содержит пять видов машин, хотя в целом комплексы могут содержать большее или меньшее количество машин в зависимости от их универсальности. Например, бульдозер ДЗ-42 в некоторых случаях можно исключить, поскольку экскаватор ЭО-2621 содержит бульдозерное оборудование для выполнения несложных работ по перемещению волоком грунтов по поверхности бермы. В таблице 1 представлен состав некоторых комплексов машин, которые могут быть использованы при очистке каналов.

Таблица 1 – Состав комплексов каналоочистительных машин
Table 1 – The composition of the canal cleaning machines complexes

Ведущая машина комплекса № 1	Машина № 2	Машина № 3	Машина № 4	Машина № 5
Каналоочиститель РР-303	Каналоочиститель ОКН-0,5	Бульдозер ДЗ-42	Экскаватор ЭО-2621	Самосвал ГАЗ-33098
Каналоочиститель МР-14	Каналоокашивающая машина КМ-82	Бульдозер на базе МТЗ	Погрузчик ТО-18	Самосвал КамАЗ-65115
Каналоочиститель МР-16	Экскаватор ЭО-3322	Погрузчик на базе МТЗ	Экскаватор ЕК-14	Самосвал ЗИЛ-5301А
Каналоочиститель КМ-82	Модификация каналоочистителя ЭМ-152	Погрузчик «Булкар»	Экскаватор ЕК-12	Самосвал КамАЗ-43255

Очевидно, что если в технологии проведения очистительных работ предусмотрено выполнение некоторых рабочих операций не только после-

довательно, но и параллельно, то это позволяет уменьшать сроки проведения работ.

В зависимости от эксплуатационно-производственных условий можно предложить множество различных вариантов комплексов. Здесь решающую роль играет наличие в мелиоративном хозяйстве тех или иных машин.

Из первой группы машин, представленной на рисунке 2, наибольшей производительностью в пределах 50–70 м³/ч обладает каналочиститель с активным рабочим органом МР-16, из второй группы максимальной производительностью обладает ЭО-3322 – 20 м³/ч, из третьей группы – ДЗ-42 – 18 м³/ч, из четвертой группы – ТО-18 (с учетом ковша наибольшей вместимости 1,9 м³), из пятой группы наибольшей грузоподъемностью обладает КамАЗ-65115. Однако, несмотря на высокие технико-эксплуатационные характеристики, комплексы, содержащие данные машины, не относятся к оптимальным. Это прежде всего связано с тем, что очистка каналов, в отличие от процесса их строительства, имеет незначительные объемы земляных работ и применение в этом случае высокопроизводительных землеройных машин нецелесообразно. Более того, наносы и заиления распределены в каналах крайне неравномерно. Поэтому применение машин хоть и не высокопроизводительных, но качественно выполняющих очистные операции становится решающим фактором при формировании комплекса [8–10].

Согласно графу для очистки канала от вершины 1 до вершины 2, т. е. от начала производства очистных работ до конца, применяется четыре комплекса, содержащих определенные машины с соответствующими технико-эксплуатационными параметрами. Алгоритм Дейкстры [11, 12] находит кратчайший путь проведения очистных работ, т. е. выбирает комплекс машин с наименьшими затратами. В данном примере это комплекс, ведущей машиной которого является каналочиститель РР-303, эта машина отличается от остальных типов каналочистителей высоким качеством про-

водимых очистных работ. Высокое качество обеспечивается благодаря использованию жестких направляющих, по которым перемещается ковш. Жесткие направляющие обеспечивают строго прямолинейное движение рабочего органа. По режиму работы данный каналочиститель относится к машинам периодического действия. Боковая навеска рабочего оборудования на трактор тягового класса 3 наиболее эффективна при работе на каналах осушительной сети.

Ежегодные объемы работ по очистке осушительных каналов связаны с количеством наносов на дне и откосах. Очистные операции на нормально функционирующих системах проводятся ежегодно в рамках ухода за сетью и периодически раз в 2–4 года. В первом случае удельные объемы наносов и заилений незначительны и находятся в пределах 0,015–0,025 м³. В таких случаях если возникает необходимость очистки дна и откосов канала, то это относительно небольшая длина, обычно недалеко от устьев каналов и в местах их сопряжений. Однако с течением времени ситуация меняется, процесс формирования наносов идет более интенсивно, и через несколько лет удельные объемы могут достигнуть 0,1–0,3 м³ и более, это угрожает нарушением нормального функционирования канала. Очистные операции в этом случае связывают с текущим ремонтом сети и выполняют специальными машинами.

Каналочиститель РР-303, агрегатируемый с гусеничным трактором третьего тягового класса, может очищать дно закрепленных каналов до 3 м, шириной по дну 0,4 и 0,6 м с заложением откосов 1:1; 1:1,5 и 1:2. В зависимости от ширины дна канала на машине могут быть применены ковши шириной 0,4 и 0,6 м и соответствующей вместимости 0,13 и 0,20 м³. С учетом того, что машина работает позиционно, длина хода ковша на одной позиции составляет 5,2 м. Техническая производительность каналочистителя с ковшом шириной 0,4 м составляет 8,0 м³/ч, а с ковшом шириной 0,6 м – 16,0 м³/ч.

В случае очистки осушительных каналов без крепления дна проведение операции удаления наносов с ковшом прямоугольного профиля сопровождается последующим сползанием наносов с откоса канала, и операцию по очистке необходимо повторить. В таких случаях целесообразно применять ковш трапецеидального профиля.

Возможность обеспечения проектных размеров дна и откосов каналов, в отличие от машин с активными рабочими органами, позволяет рассматривать каналочиститель РР-303 в качестве ведущей машины формируемого комплекса.

К числу основных технико-эксплуатационных показателей при определении экономической эффективности использования того или иного каналочистительного комплекса с ведущей машиной ковшового типа относится годовая эксплуатационная производительность.

Поскольку общестроительные экскаваторы, используемые в различных комплексах, работают в различных грунтовых условиях, то их эксплуатационную производительность следует рассматривать как средневзвешенную величину с учетом выполняемых ими видов работ.

Годовая эксплуатационная производительность в общем виде определяется по формуле:

$$\Pi = \Pi_{\text{э.ч.}} \cdot T_{\text{г}} \cdot K_{\text{пр}},$$

где $\Pi_{\text{э.ч.}}$ – средневзвешенная часовая эксплуатационная производительность, единиц продукции в час;

$T_{\text{г}}$ – продолжительность работы машины в году, машино-часов;

$K_{\text{пр}}$ – коэффициент учета простоев.

Согласно графу, представленному на рисунке 2, уже на первой операции по очистке каналов алгоритм Дейкстры выбрал каналочиститель РР-303 как машину одного из комплексов с наименьшими затратами. Несмотря на то, что данная машина относится к машинам цикличного дей-

ствия, она все же обладает высокой производительностью, а значит, и меньше всех тратит времени на очистку не только дна канала, но и прилежащих ко дну частей откосов без повторных и доделочных операций. Минимум продолжительности проведения операций является критерием для рассматриваемого алгоритма.

Производительность каналаочистителя РР-303 можно определить по формуле:

$$\Pi = q \cdot n,$$

где q – вместимость ковша, м^3 ;

$$n = \frac{3600}{T_{\text{ц}}} = \frac{3600}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4} \text{ – число циклов в час;}$$

$T_{\text{ц}}$ – продолжительность цикла, с;

t_1, t_2, t_3, t_4 – соответственно продолжительность копания грунта ковшом, с; продолжительность подъема ковша с грунтом, с; продолжительность разгрузки ковша, с; продолжительность установки ковша на дно канала, с.

В связи с тем, что ковш имеет трапецеидальный профиль, технология очистки канала не предусматривает дополнительную операцию по очистке откосов. Конструкции остальных ведущих каналаочистителей представленных комплексов не обеспечивают возможность качественной одновременной очистки дна и откосов канала.

Выводы

1 По проведенным исследованиям представлен граф, содержащий четыре возможных варианта комплексов машин для очистки каналов мелиоративной сети.

2 Оптимальный комплекс, содержащий следующие машины: каналаочиститель РР-303, каналаочиститель ОКН-0,5, бульдозер ДЗ-42, экскаватор ЭО-2621 и самосвал ГАЗ-33098, выбран на основании алгоритма Дейкстры.

3 При выборе оптимального комплекса учитывались технико-эксплуатационные, технико-экономические показатели машин, а также возможности не только последовательного, но и параллельного проведения технологических операций, что в свою очередь приводит к уменьшению сроков производства работ.

4 При формировании сетевых графов по определению оптимальных комплексов следует учитывать, что каналы могут иметь различные характеристики, соответственно, разное количество наносов и неравномерное их распределение по всей протяженности канала. В таких случаях выбор комплекса будет увязан с естественно-производственными условиями эксплуатации.

5 Важную роль при выборе оптимального комплекса играют технико-эксплуатационные характеристики и конструктивные особенности ведущей машины, которая выполняет основную операцию по очистке канала, в нашем случае это каналоочиститель РР-303 с ковшем на жестких направляющих. Такая конструкция позволяет наиболее качественно производить очистку дна и прилежащих ко дну частей канала.

Список источников

1. Анженков А. С., Линкевич Н. Н. Состояние мелиоративных систем в Беларуси: задачи и перспективы // Мелиорация. 2022. № 1(99). С. 5–13.
2. Абдулмажидов Х. А. Комплексное применение каналоочистительных машин // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». 2013. № 3(59). С. 28–32.
3. Карапетян М. Л., Абдулмажидов Х. А. Теоретическое исследование динамики рабочего органа каналоочистителя РР-303 // Природообустройство. 2015. № 2. С. 78–80.
4. Дубенок Н. Н., Ольгаренко Г. В. Перспективы восстановления мелиоративного комплекса Российской Федерации // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2021. № 2. С. 56–59. DOI: 10.30850/vrsn/2021/2/56-59.
5. Проблемы и пути повышения роли мелиоративных систем Рязанской области / П. Н. Ванюшин, А. В. Кузин, Т. Н. Сысоева, А. В. Нефедов, Н. А. Иванникова // Мелиорация и водное хозяйство. 2018. № 5. С. 6–12.
6. Кизяев Б. М., Пунинский В. С. Методические основы формирования федеральных регистров технологий и машин для эксплуатации, ремонта и реконструкции мелиоративных сетей // Основные результаты научных исследований института за 2018 год: сб. науч. тр. М.: Всерос. науч.-исслед. ин-т гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова, 2019. С. 129–138.

7. Рамазанова Б. М., Карпова О. В., Аминов Ж. А. Роль и значение мелиоративных систем в Саратовской области // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., г. Саратов, 21–22 апр. 2021 г. Саратов: Амирит, 2021. С. 68–72.

8. Абдразаков Ф. К., Рукавишников А. А. Интенсификация мелиоративного производства путем совершенствования технологий реконструкции и строительства оросительных каналов // Мелиорация и водное хозяйство. 2019. № 1. С. 6–9.

9. Воеводина Л. А., Воеводин О. В. Организационно-правовые аспекты создания и функционирования кооперативного мелиоративного парка // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2020. № 1(37). С. 183–199. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1040> (дата обращения: 01.09.2022). DOI: 10.31774/2222-1816-2020-1-183-199.

10. Анженков А. С., Макоед В. М. Структура мелиоративного комплекса Республики Беларусь и осушение тяжелых почв на примере Витебской области // Мелиорация и водное хозяйство. 2020. № 3. С. 23–27.

11. A new algorithm for solving a special matching problem with a general form value function under constraints / D. V. Uzhegov, A. A. Anan'ev, P. V. Lomovitskii, A. N. Khlyupin // Automation and Remote Control. 2019. Vol. 80, № 1. P. 81–92. DOI: 10.1134/S0005117919010077.

12. Pathfinding optimization when solving the paparazzi problem comparing A* and Dijkstra's algorithm / S. Baldi, N. Maric, R. Dornberger, T. Hanne // 2018 6th International Symposium on Computational and Business Intelligence (ISCBI). 2018. P. 16–22. DOI: 10.1109/ISCBI.2018.00014.

References

1. Anzhenkov A.S., Linkevich N.N., 2022. *Sostoyanie meliorativnykh sistem v Belarusi: zadachi i perspektivy* [State of land reclamation systems in Belarus: Challenges and prospects]. *Melioratsiya* [Land Reclamation], no. 1(99), pp. 5–13. (In Russian).

2. Abdulmazhidov H.A., 2013. *Kompleksnoe primeneniye kanaloochistitel'nykh mashin* [Integrated use of canal cleaning machines]. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V. P. Goryachkina"* [Herald of Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V. P. Goryachkin"], no. 3(59), pp. 28–32. (In Russian).

3. Karapetyan M.L., Abdulmazhidov Kh.A., 2015. *Teoreticheskoe issledovanie dinamiki rabochego organa kanaloochistitelya RR-303* [Theoretical study of the working body dynamics of canal cleaner RR-303]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 2, pp. 78–80. (In Russian).

4. Dubenok N.N., Olgarenko G.V., 2021. *Perspektivy vosstanovleniya meliorativnogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii* [Recovery prospects for the Russian Federation reclamation complex]. *Vestnik rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki* [Bull. of Russian Agricultural Science], no. 2, pp. 56–59, DOI: 10.30850/vrsn/2021/2/56-59. (In Russian).

5. Vanyushin P.N., Kuzin A.V., Sysoeva T.N., Nefedov A.V., Ivannikova N.A., 2018. *Problemy i puti povysheniya roli meliorativnykh sistem Ryazanskoy oblasti* [Problems and ways of increasing the role of reclamation sand drainage systems in Ryazan region]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land Reclamation and Water Management], no. 5, pp. 6–12. (In Russian).

6. Kizyaev B.M., Puninsky V.S., 2019. *Metodicheskie osnovy formirovaniya federal'nykh registrov tekhnologiy i mashin dlya ekspluatatsii, remonta i rekonstruktsii meliorativnykh setey* [Methodical basis for the formation of federal registers of technologies and ma-

chines for the operation, repair and reconstruction of reclamation networks]. *Osnovnye rezul'taty nauchnykh issledovaniy instituta za 2018 god: sb. nauchnykh trudov* [Main Results of Scientific Research of the Institute for 2018: coll. scientific works]. Moscow, All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Reclamation named after A. N. Kostyakov, pp. 129-138. (In Russian).

7. Ramazanova B.M., Karpova O.V., Aminov Zh.A., 2021. *Rol' i znachenie meliorativnykh sistem v Saratovskoy oblasti* [The role and importance of land reclamation systems in Saratov region]. *Innovatsii v prirodoobustroytve i zashchite v chrezvychaynykh situatsiyakh: materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Innovations in Environmental Management and Protection in Emergency Situations: Proc. of the VIII International Scientific-Practical Conference]. Saratov, Amirit Publ., pp. 68-72. (In Russian).

8. Abdrazakov F.K., Rukavishnikov A.A., 2019. *Intensifikatsiya meliorativnogo proizvodstva putem sovershenstvovaniya tekhnologiy rekonstruktsii i stroitel'stva orositel'nykh kanalov* [Intensification of land reclamation production by improving the technologies of reconstruction and construction of irrigation canals]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land Reclamation and Water Management], no. 1, pp. 6-9. (In Russian).

9. Voevodina L.A., Voevodin O.V., 2020. [Organizational and legal aspects of the creation and functioning of a cooperative reclamation park]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, no. 1(37), pp. 183-199, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1040> [accessed 01.09.2022], DOI: 10.31774/2222-1816-2020-1-183-199. (In Russian).

10. Anzhenkov A.S., Makoed V.M., 2020. *Struktura meliorativnogo kompleksa Respubliki Belarus' i osushenie tyazhelykh pochv na primere Vitebskoy oblasti* [Structure of the reclamation complex of the Republic of Belarus and the drainage of heavy soils on the example of Vitebsk region]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land Reclamation and Water Management], no. 3, pp. 23-27. (In Russian).

11. Uzhegov D.V., Anan'ev A.A., Lomovitskii P.V., Khlyupin A.N., 2019. A new algorithm for solving a special matching problem with a general form value function under constraints. *Automation and Remote Control*, vol. 80, no. 1, pp. 81-92, DOI: 10.1134/S0005117919010077.

12. Baldi S., Maric N., Dornberger R., Hanne T., 2018. Pathfinding optimization when solving the paparazzi problem comparing A* and Dijkstra's algorithm. 6th International Symposium on Computational and Business Intelligence (ISCBI), pp. 16-22, DOI: 10.1109/ISCBI.2018.00014.

Информация об авторах

Х. А. Абдулмажидов – заместитель директора института, кандидат технических наук, доцент;

В. И. Балабанов – заведующий кафедрой, доктор технических наук, профессор;

Н. Б. Мартынова – доцент кафедры, кандидат технических наук, доцент.

Information about the authors

Kh. A. Abdulmazhidov – Deputy Director of the Institute, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

V. I. Balabanov – Head of the Department, Doctor of Technical Sciences, Professor;

N. B. Martynova – Associate Professor of the Department, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.09.2022; одобрена после рецензирования 26.10.2022; принята к публикации 02.11.2022.

The article was submitted 26.09.2022; approved after reviewing 26.10.2022; accepted for publication 02.11.2022.