

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕЛИОРАТИВНО- ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Обзорная статья

УДК 626.83

Способы регулирования работы насосов насосных станций

Олег Владимирович Воеводин¹, Антон Леонидович Кожанов²

^{1, 2}Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация

¹Vovteh@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1098-2979>

²AntonKozhanov1983@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4240-1967>

Аннотация. Цель: провести научный обзор и анализ способов регулирования работы насосов, применяемых в различных отраслях, для определения наиболее экономически и энергетически целесообразного или установления необходимости разработки новых способов регулирования на мелиоративных насосных станциях (НС). **Обсуждение.** Материалами для проведения научного обзора послужили предлагаемые различными учеными способы регулирования работы насосов, которые отражены в научной литературе, авторских свидетельствах и патентах. В ходе исследований проводились поиск, анализ, сравнение и систематизация способов регулирования работы насосов. В результате анализа источников информации были установлены различные типы приводов насосов, используемые на насосах НС, такие как двигатели внутреннего сгорания (ДВС) и электродвигатели. Анализируя возможные способы регулирования, установили, что дросселирование задвижками, применение байпаса, изменение диаметра рабочего колеса и впуск воздуха используются вне зависимости от типа привода. Для приводов с использованием ДВС применяется способ регулирования за счет изменения скорости вращения путем увеличения или уменьшения оборотов двигателя дроссельной заслонкой. Для приводов с использованием электроприводов предлагаются способы регулирования работы насосов за счет изменения скорости вращения с применением различных типов электродвигателей (синхронные и асинхронные), устройств и приспособлений, а также их компоновки с электрическими сетями или генераторами. **Выводы.** В результате исследований выявлены два типа регулирования (количественный и качественный) с их достоинствами и недостатками. Установлен наиболее экономически и энергетически целесообразный способ, который заключается в изменении скорости электроприводов с асинхронными двигателями при одновременном регулировании частоты и напряжения. Определено направление дальнейшего совершенствования способа регулирования с применением редукторов или различных коробок передач на ДВС для возможности использования менее мощных ДВС в целях экономии энергозатрат.

Ключевые слова: насосная станция, насос, способ регулирования, привод, расход, напор, работа насоса, режим работы

Апробация результатов исследования: основные положения статьи доложены на Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы мелиоративно-водохозяйственного комплекса и пути их решения» (г. Новочеркасск, 11 октября 2024 г.).

Для цитирования: Воеводин О. В., Кожанов А. Л. Способы регулирования работы насосов насосных станций // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2024. Т. 94, № 3. С. 105–124.

MODERN PROBLEMS OF THE RECLAMATION AND WATER MANAGEMENT COMPLEX AND WAYS TO SOLUTION THEM

Review article

Methods of regulating the pump operation of pumping stations

Oleg V. Voevodin¹, Anton L. Kozhanov²

^{1,2}Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,
Russian Federation

¹Vovteh@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1098-2979>

²AntonKozhanov1983@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4240-1967>

Abstract. Purpose: to conduct a scientific review and analysis of the methods of regulating the operation of pumps used in various industries in order to determine the most economically and energetically feasible one or to establish the need to develop new methods of regulation at reclamation pumping stations (PS). **Discussion.** The materials for the scientific review were the methods regulating the pump operation proposed by various scientists, which are reflected in the scientific literature, author's certificates and patents. During the research, a search, analysis, comparison and systematization of methods regulating the pump operation were carried out. As a result of the analysis of information sources, various types of pump drives used at PS pumps such as internal combustion engines (ICE) and electric motors were determined. Analyzing the possible ways of regulation, it was found that throttling with valves, the use of a bypass, changing the impeller diameter and air intake are used regardless of the type of drive. For drives using ICE, a method of regulation by changing the rotation speed by increasing or decreasing the engine speed with a throttle valve is used. For drives using electric drives, methods for regulating the operation of pumps by changing the rotation speed using various types of electric motors (synchronous and asynchronous), devices and accessories, as well as their arrangement with electric networks or generators are proposed. **Conclusions.** As a result of the research, two types of regulation (quantitative and qualitative) with their advantages and disadvantages were identified. The most economically and energetically feasible method which consists in changing the speed of electric drives with asynchronous motors with simultaneous regulation of frequency and voltage was determined. The direction of further improvement of the regulation method using gears or various gearboxes on ICEs was determined for possible use of less powerful ICEs in order to save energy costs.

Keywords: pumping station, pump, regulation method, drive, flow rate, head, pump operation, operating mode

Evaluation of the research results: the main provisions of the article were reported at the All-Russian scientific and practical conference “Modern Problems of Land Reclamation and Water Industrial Complex and Ways to Solve Them” (Novocherkassk, October 11, 2024).

For citation: Voevodin O. V., Kozhanov A. L. Methods of regulating the pump operation of pumping stations. *Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture*. 2024;94(3):105–124. (In Russ.).

Введение. В последние годы возросшая инфляция привела к быстрому росту цен на различные энергоресурсы, такие как электроэнергия, топливо для двигателей внутреннего сгорания и другие ресурсы, из-за чего сильно возросли расходы в различных областях промышленности и сель-

ского хозяйства, в частности на поддержание работоспособности мелиоративных систем. Результатом данного повышения расходов стало то, что перед многими эксплуатирующим организация встали вопросы уменьшения энергоемкости подачи воды в мелиоративные системы, т. е. необходимость энергосбережения.

Анализ потребления электроэнергии мелиоративными насосными станциями выявил, что для решения данной проблемы необходимо проведение организационно-технических и энергосберегающих мероприятий. Рассматривая работу насосов НС, подающих воду для работы круговых, фронтальных или фронтально-круговых дождевальных машин, наблюдаем, что в некоторые промежутки времени необходимо то увеличивать, то снижать подачу и напор подаваемой оросительной воды [1–4], а также происходит постоянное изменение количества работающих одновременно дождевальных машин, изменение поливных норм, это требует постоянной регулировки подачи оросительной воды [5–7].

Регулировать подачу оросительной воды можно за счет регулирования работы насосов НС [8–12]. Для работы насосов могут применяться электродвигатели, двигатели внутреннего сгорания (ДВС) [13, 14], при этом каждый из данных типов двигателей имеет как преимущества, так и недостатки. К двигателям внутреннего сгорания можно отнести как дизельные и бензиновые, так и более экологичные – газовые. При этом развитие частных хозяйств с применением различных дождевальных машин, работающих от закрытой напорной сети, без наличия действующей сети привело к широкому применению мобильных насосных станций, работающих на ДВС.

При наличии электросети применяются электродвигатели, которые могут быть постоянного и переменного тока, синхронные и асинхронные. При этом существуют также различные способы регулирования работы насосов за счет регулирования частоты вращения электродвигателей [15–17].

Наличие разнообразных приводов для насосов, а также способов регулирования работы насосов НС говорит о необходимости определения наиболее экономически и энергетически целесообразного либо разработки новых способов регулирования работы насосов для различных применяемых двигателей.

Исходя из вышеизложенного, целью настоящей работы является проведение научного обзора и анализа способов регулирования работы насосов, применяемых в различных отраслях, для определения наиболее экономически и энергетически целесообразного или установления необходимости разработки новых способов регулирования на мелиоративных насосных станциях (НС).

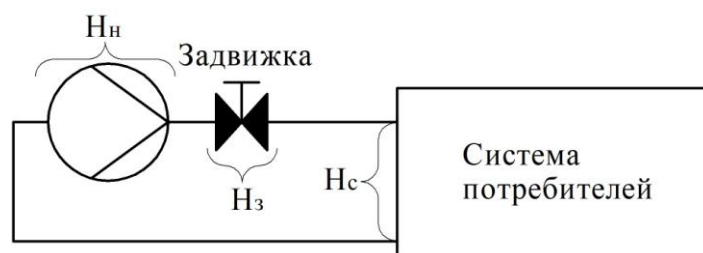
Обсуждение. Материалами для проведения научного обзора послужили предлагаемые различными учеными (гидравликами, мелиораторами) конструктивные решения компоновки насосных станций и предлагаемых способов регулирования их работы, которые отражены в научной литературе, авторских свидетельствах и патентах. В процессе проведения научного обзора использовались аналитический, сравнительный, системный и логический методы научного исследования [18].

Рассматривая насосные станции с двигателями внутреннего сгорания, видим, что самая распространенная регулировка работы насоса производится за счет регулировки скорости вращения двигателем крыльчатки, которая достигается путем увеличения или уменьшения оборотов двигателя дроссельной заслонкой.

Еще одним способом регулирования работы для данной компоновки является дросселирование задвижкой на напорном трубопроводе. При этом данный способ является совсем не экономичным, т. к. двигатель работает на полную мощность, потребляя максимальное количество топлива.

Проанализировав способы регулирования работы насосов с электродвигателями, выявили, что дросселирование задвижкой также применимо [19].

Схема регулирования данным способом приведена на рисунке 1.



H_n – напор насоса; H_z – напор на задвижке; H_c – напор в системе потребителей
 H_n – pump head; H_z – valve pressure; H_s – pressure in the consumer system

Рисунок 1 – Схема регулирования дросселированием
Figure 1 – Throttling control diagram

При данном способе насос должен обеспечивать напор H_n , который превышает необходимый напор в системе потребителей H_c , при этом при повышении сопротивления системы снижается расход. Для того, чтобы снизить энергопотребление, можно применить насос меньшего размера с требуемым расходом, но и с более низким напором [8, 10].

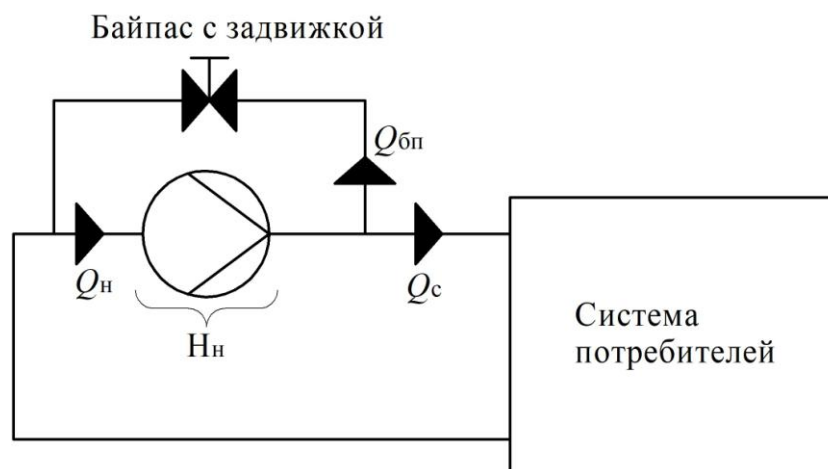
При таком способе регулирования есть недостаток, заключающийся в повышенном энергопотреблении за счет работы более мощного насоса и снижения его характеристик дросселированием, что также сказывается на долговечности работы насоса, работающего под «подпором».

Еще один способ регулирования работы насосов применительно к насосам с двигателями внутреннего сгорания или электродвигателями – способ регулирования расхода байпасом. Схема регулирования байпасом приведена на рисунке 2.

При данном способе регулирования через байпас даже при нулевом расходе потребителей насос не будет работать «на закрытую задвижку», т. к. байпас предусматривает пропуск определенного расхода $Q_{\delta n}$. При этом максимальный расход насоса равняется сумме расхода байпаса и всех потребителей, т. е. $Q_n = Q_{\delta n} + Q_c$ [10, 12].

При таком способе регулирования есть недостаток. Рассматривая работу насоса с меньшими характеристиками и возможностью автоматиче-

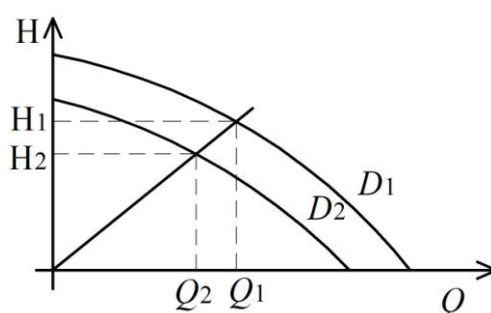
ской остановки или регулирования при нулевом или малом расходе, можно снизить потребление энергии.



H_n – напор насоса; Q_n – расход насоса; Q_c – расход системы потребителей; $Q_{бп}$ – расход через байпас
 H_n – pump head; Q_n – pump flow rate; Q_s – consumer system flow rate; Q_{bp} – flow rate through bypass

Рисунок 2 – Схема регулирования дросселированием байпасом
Figure 2 – Bypass throttling control diagram

Существует способ регулирования работы насосов в составе насосных станций, основанный на изменении диаметра рабочего колеса насоса. За счет уменьшенного диаметра снижаются характеристики насоса, что наглядно можно увидеть на схеме (рисунок 3).



H_1 – напор при стандартном размере рабочего колеса D_1 ; H_2 – напор при уменьшенном размере рабочего колеса D_2 ; Q_1 – расход при стандартном размере рабочего колеса D_1 ;
 Q_2 – расход при уменьшенном размере рабочего колеса D_2

H_1 – head with standard impeller size D_1 ; H_2 – head with reduced impeller size D_2 ;
 Q_1 – flow rate with standard impeller size D_1 ; Q_2 – flow rate with reduced impeller size D_2

Рисунок 3 – График работы насоса с различными диаметрами рабочего колеса

Figure 3 – Pump operation graph with different impeller diameters

Как показали исследования А. О. Аверьянова [10], использование данного способа дает незначительное регулирование расходно-напорных характеристик насоса в пределах 2–3 %.

Еще одним существенным недостатком такого способа является то, что изменение размера рабочего колеса возможно только при разборе насоса, т. е. в процессе проведения ремонта или монтажа в начале сезона использования насосной станции, изменение же в процессе работы насоса невозможно.

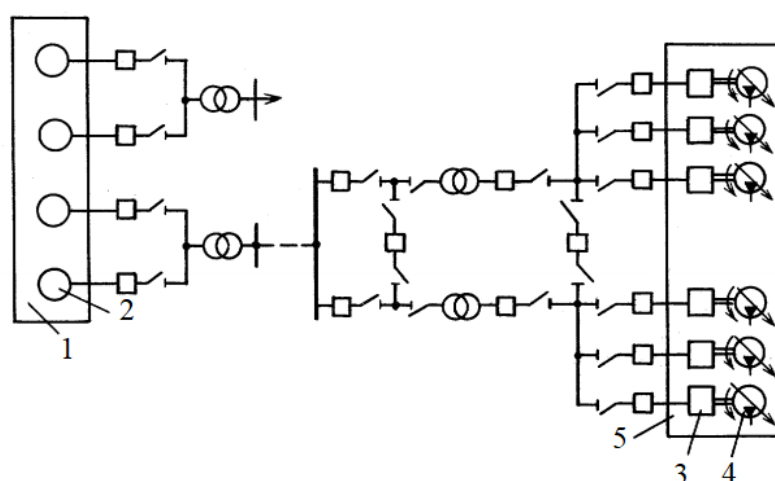
Рассматривая вариант с центробежными насосами, нельзя оставить без внимания способ регулирования работы насоса впуском воздуха во всасывающий трубопровод [9, 10]. Так, Э. Е. Назаркин, В. В. Сушко, О. Н. Померанцев в статье [9], рассматривая данный способ регулирования, выделяют серьезные достоинства, такие как минимальные затраты по внедрению, простота эксплуатации и удобство автоматизации.

Проведенные ими исследования показали, что при работе насоса на газожидкостной смеси происходит существенное снижение напора, но при этом имеет место относительно незначительное снижение мощности. Сравнивая способ дросселирования и впуска воздуха, Э. Е. Назаркин пришел к выводу, что «способ регулирования впуском воздуха более экономичен, чем регулирование задвижкой. Впуск воздуха при небольших изменениях подачи – не менее 30 % от оптимальной – является более выгодным, чем дросселирование» [9].

Рассматривая этот способ, можно обратить внимание на то, что присутствие большого количества воздуха в воде будет способствовать появлению кавитации, которая в свою очередь будет оказывать негативное влияние на рабочие колеса насосов, уменьшая их срок службы [10]. Данное явление можно считать одним из весомых недостатков предлагаемого способа регулирования.

Рассматривая насосы с приводом из электродвигателя, можно проанализировать различные способы регулирования, предложенные автора-

ми в изобретениях и научных трудах. Так, К. А. Любичкий и др. [20] предлагают способ регулирования режима работы насоса с электродвигателем для насосных станций различного назначения. Способ заключается в изменении скорости вращения электродвигателей при поддержании требуемых значений технологических параметров работы насосной станции. Достигается это за счет изменения расхода рабочего тела через турбины генераторов электроподстанции, тем самым изменяется частота напряжения питания электродвигателей насосов. На рисунке 4 приведена схема подключения между насосной и электрической станциями, при этом электрическая станция состоит из агрегатов с генераторами, подключенных к электродвигателям насосов самой насосной станции [20].



1 – электрическая станция; 2 – генераторы; 3 – электродвигатели;
 4 – насосы; 5 – насосная станция

1 – power station; 2 – generators; 3 – electric motors; 4 – pumps; 5 – pumping station

Рисунок 4 – Схема подключения между насосной и электрической станциями [20]

Figure 4 – Connection diagram between pumping and power stations [20]

Способ регулирования работы насосами насосной станции заключается в том, что в процессе подачи воды насосами питание на их электродвигатели подается от генераторов. За счет изменения скорости вращения роторов турбины генераторов корректируется частота питающего напряжения, что в свою очередь изменяет скорость вращения ротора электродвигателя.

Для поддержания заданной скорости вращения ротора используется регулятор турбины. При этом, если возникает отклонение скорости вращения от задатчика, формируется управляющее воздействие, вызывающее срабатывание сервопривода, который перемещает рабочий орган, меняя расход рабочего тела через турбину и восстанавливая скорость вращения ее ротора. Для изменения режимов работы насосов определяют требуемую скорость вращения и изменяют установку задатчика на новую, соответствующую [20]:

$$n_2 = n_1 \cdot \frac{Q_2}{Q_1} \text{ или } n_2 = n_1 \cdot \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}, \quad (1)$$

где n_2 – скорость вращения нового режима, об/мин;

n_1 – скорость вращения до регулирования, об/мин;

Q_2 – расход нового режима, м³/ч;

Q_1 – расход до регулирования, м³/ч;

H_2 – напор нового режима, м;

H_1 – напор до регулирования, м.

Так в дальнейшем и происходит регулирование всех необходимых режимов для поддержания оптимального варианта работы насосной станции.

Недостатком является то, что оценивается работа одного однотипного насоса и определяется режим работы для всей насосной станции, включающей группу насосов с одинаковыми характеристиками. Данный способ применим только для однотипных насосов и не подразумевает оптимизацию работы насосов с различными характеристиками, работающих в одной группе, что снижает применимость данного способа.

С. Г. Беляев и др. [21] предлагают способ регулирования режима работы насоса при различных внешних воздействиях, таких как колебания уровней воды. В предложенном изобретении расход поддерживается путем изменения геометрии направляющего аппарата и угла установки лопастей рабочего колеса.

П. Р. Хлопенков и А. В. Краснов [22] предложили способ регулирования режимов работы насосных станций, который применим к эксплуатации как насосов, так и насосных станций.

Предложенная ими схема насосной установки приведена на рисунке 5.

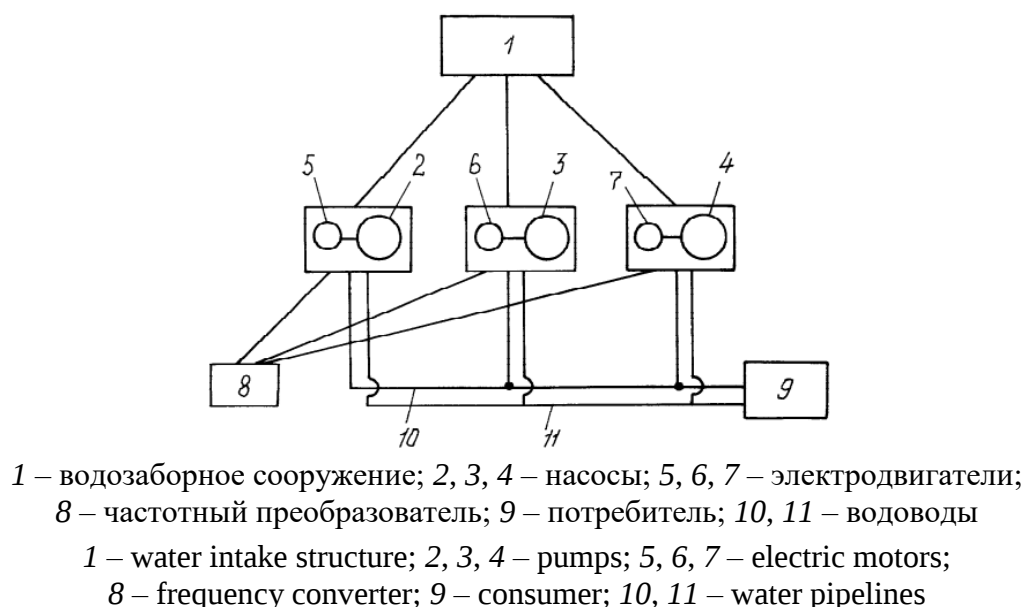


Рисунок 5 – Схема насосной установки [22]

Figure 5 – Pumping unit scheme [22]

При этом сам способ позволяет уменьшать энергозатраты за счет ликвидации избыточных напоров.

Рассматривая принцип работы предложенного способа регулирования, который применим на насосной станции с параллельно установленными насосами, строят кривую расходно-напорных характеристик $(Q-H)_n$. В дальнейшем рассчитывают и отмечают точку гидравлических потерь водоводов.

Для регулирования работы насосов рассчитывают некоторое количество кривых расходно-напорных характеристик $(Q-H)_n$ при $n = 1-7$, зависящих от частоты вращения рабочих колес насосов за счет применения частотного преобразователя при подаче напряжения на электродвигатели.

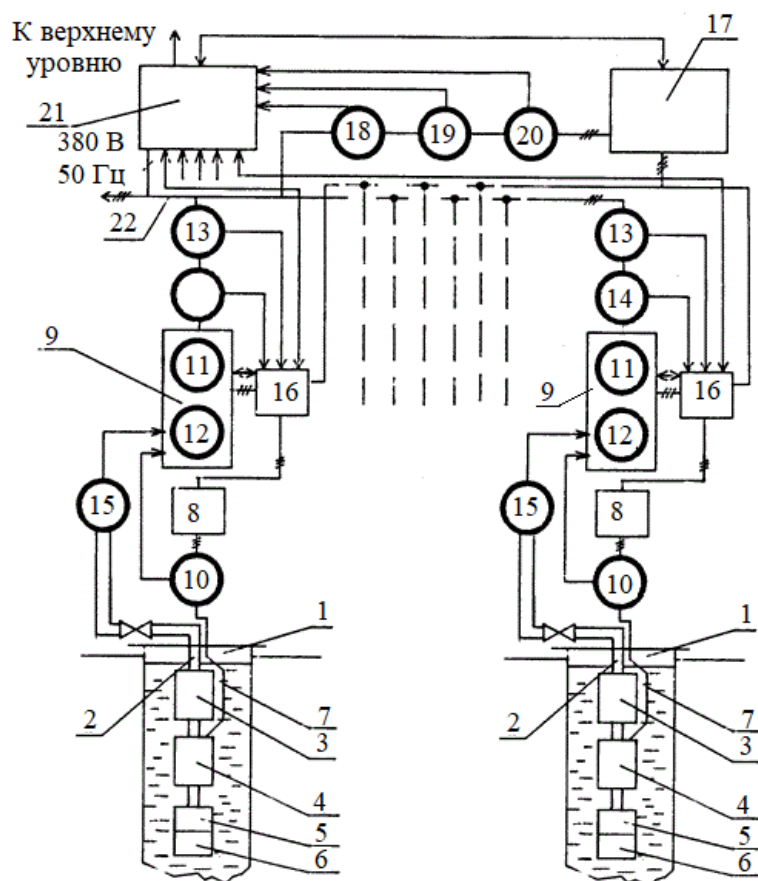
В точках пересечения кривых расходно-напорных характеристик насосов и гидравлических потерь водоводов берутся значения оптимальных частот вращения. Это позволяет работать насосной станции без избыточного давления в водоводах, что и дает возможность экономии энергозатрат.

Р. Н. Ахмадиев, А. В. Артюхов, В. А. Иванов и другие авторы [16] предложили способ регулирования режима работы скважины с электроцентробежным насосом. Здесь регулирование происходит также за счет применения частотно-регулируемого привода.

Способ с подобным частотным регулированием предложили и такие ученые, как П. Т. Семченко и И. А. Гордон [23]. Принцип заключается в регулировании центробежных агрегатов, имеющих возможность пуска с частотным регулированием электродвигателей, но с питанием от электросетей и стабилизацией номинального режима отбора жидкости. Схема управления погружными насосами при эксплуатации в группе скважин приведена на рисунке 6.

Известно устройство автоматического управления насосной станцией, предложенное Б. С. Евдокимовым и В. Г. Кистенем [24], в котором помимо насосов с электроприводами имеется частотный преобразователь, а также управляющее устройство преобразователя. Работает данное устройство за счет изменения уровня в магистрали при увеличении расхода потребителями и поступлении сигналов с датчиков в начале и конце магистрали, подают информацию для вращения реохорда, который изменяет частоту преобразователя и, как следствие, – скорость вращения электропривода. Если нагрузка на данный насос максимальна, то за счет контактного устройства срабатывает пуск электропривода какого-либо из насосов, если нагрузка на первый насос снижается до «холостого хода», то отключается дополнительный насос. При этом напор постоянно контролируется датчиками напора совместно с реохордом за счет взаимосвязи.

Недостатком всех рассмотренных выше предложенных различными авторами способов регулирования является то, что не учитывается режим потребления перекачиваемой жидкости потребителями с изменяющимися режимами за счет так называемого «дресселирования», а также сложность исполнения.



- 1 – скважина; 2 – труба; 3 – насос; 4 – электродвигатель; 5 – датчик давления;
 6 – датчик температуры обмотки статора; 7 – кабель питания; 8 – согласующий трансформатор; 9 – комплекс защиты; 10 – измерительный трансформатор;
 11 – прибор для измерения сопротивления кабеля; 12 – прибор для измерения вибраций насоса; 13 – измеритель активной мощности; 14 – измеритель реактивной мощности; 15 – датчик буферного давления; 16 – коммутирующее устройство;
 17 – преобразователь частоты напряжения; 18, 19, 20 – измерительные преобразователи входных напряжений; 21 – микропроцессорный терминал; 22 – электросеть
- 1 – well; 2 – pipe; 3 – pump; 4 – electric motor; 5 – pressure sensor; 6 – stator winding temperature sensor; 7 – power cable; 8 – matching transformer; 9 – protection complex;
 10 – measuring transformer; 11 – device for measuring cable resistance;
 12 – device for measuring pump vibrations; 13 – active power meter; 14 – reactive power meter; 15 – buffer pressure sensor; 16 – switching device; 17 – voltage frequency converter;
 18, 19, 20 – measuring input voltage converters; 21 – microprocessor terminal;
 22 – electrical network

Рисунок 6 – Предложенная схема управления по патенту № 2050472 [23]
Figure 6 – Proposed control scheme according to patent No. 2050472 [23]

В свою очередь В. Г. Николаев [25] предлагает общий способ регулирования работы лопастных нагнетателей применимо к системам подачи жидкой среды. Смысл регулирования подразумевает проведение анализа потребления энергии, которая затрачивается на работу группы нагнетателей, при условии неравномерной нагрузки из-за регулирования подачи

дросселированием на трубопроводах с использованием разнотипных нагнетателей, но с личным управлением каждым из них. При этом обеспечивается их совместная работа в общей группе.

Рассматривая применение различных современных электродвигателей для насосов, можно выделить, что основными являются двигатели синхронного и асинхронного типа. Двигатели синхронного типа сложнее в конструктивном исполнении, а также в работе. В связи с этим данный тип целесообразнее для применения на мощных насосах [13].

Асинхронные двигатели более приемлемы для работы в составе насосов, но и они имеют недостаток по отношению к перепадам напряжения в сети, который устраняется установкой преобразователя частоты. Но в свою очередь преобразователь частоты обеспечивает плавную регулировку скорости [13]. Развитие в последнее время различной электроники, в том числе многообразных систем управления, преобразователей, дало возможность массового применения данного способа для регулирования режимов работы асинхронных приводов насосов, в которых скорость регулируется с одновременным изменением напряжения и частоты.

Проведя анализ всех способов регулирования работы насосов, приведенных выше, можно сказать, что данные способы допустимо разделить на два типа. Количественный тип объединяет способы при неизменной скорости работы насоса с регулированием дросселированием задвижкой как на всасывающем, так и напорном трубопроводе, применение байпаса, изменение диаметра рабочего колеса и впуск воздуха во всасывающий трубопровод. Качественный тип объединяет способы при изменяющейся скорости работы рабочих колес насосов, такие как увеличение или уменьшение оборотов двигателя дроссельной заслонкой на двигателях внутреннего сгорания или изменение скорости электроприводов с применением различных приспособлений. У каждого из этих типов есть свои преимущества и недостатки (рисунок 7).



Рисунок 7 – Способы регулирования работы насосов насосных станций

Figure 7 – Methods of regulating the pump operation of pumping stations

Выводы. В основе проводимого научного анализа лежала необходимость определения наиболее экономически и энергетически целесообразного способа регулирования работы насосов либо получение информации о необходимости разработки новых способов регулирования работы насосов для различных применяемых двигателей.

Для обеспечения скоординированной работы насосной станции и системы подачи воды применяются разнообразные способы регулирования работы насосов, и все они направлены на сбалансированность напорно-расходной характеристики, а в последнее время – на снижение избыточного энергопотребления (электроэнергии или топлива).

Проведенный анализ показал, что на сегодняшний день существует много различных способов регулирования, объединенных в два типа: количественный (регулирование дросселированием задвижкой, применение байпаса, изменение диаметра рабочего колеса, впуск воздуха во всасывающий трубопровод) и качественный (изменение оборотов ДВС дроссельной заслонкой, изменение скорости электроприводов с применением различных приспособлений). Наиболее экономически и энергетически целесообразным является способ изменения скорости электроприводов с асинхронными двигателями при одновременном регулировании частоты и напряжения.

Малоизученным остается способ регулирования за счет изменения скорости приводов с ДВС, рассматривается только один – регулирование оборотов двигателя дроссельной заслонкой. При этом не рассматривается вопрос регулирования оборотов привода насоса за счет применения редукторов или различных коробок передач для возможности использования максимальной мощности двигателя с применением менее мощных ДВС для экономии энергозатрат.

Список источников

1. Совершенствование технологии полива дождевальными машинами кругового действия «КАСКАД» / Д. А. Соловьев, Л. А. Журавлева, В. А. Соловьев, Р. Н. Кузнецов // Научная жизнь. 2019. № 1. С. 57–65. EDN: HDDVJO.

Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2024. Т. 94, № 3. С. 105–124.
Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture. 2024. Vol. 94, no. 3. P. 105–124.

2. Соловьев Д. А., Журавлева Л. А. Ресурсосбережение при проектировании и эксплуатации дождевальных машин кругового действия // Аграрный научный журнал. 2019. № 8. С. 81–88. DOI: 10.28983/asj.y2019i8pp81-88. EDN: EEWTCR.

3. Куприянов А. А. Совершенствование конструкции дождевальной машины кругового действия // Наука и молодежь: сб. науч. тр. / Новочеркас. инж.-мелиоратив. ин-т им. А. К. Кортунова Донского ГАУ. Вып. 6. Инновации в современном агропромышленном комплексе. Новочеркасск, 2019. С. 13–19. EDN: TMNOFC.

4. Прочий Д. В., Волкова Е. А., Коржов В. И. Использование элементов моделирования работы мелиоративных насосных станций при переходных гидравлических режимах // Мелиорация как драйвер модернизации АПК в условиях изменения климата: материалы IV Междунар. науч.-практ. интернет-конф., г. Новочеркасск, 24–26 апр. 2023 г. Новочеркасск: Лик, 2023. С. 59–64. EDN: QQENNM.

5. Кожанов А. Л., Воеводин О. В. Осушительно-увлажнительные системы на равнинных территориях с применением фронтальных и фронтально-круговых дождевальных машин // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. 2021. Т. 11, № 3. С. 95–108. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1216>. DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-3-95-108. EDN: GZRQZT.

6. Система управления широкозахватной дождевальной машины кругового действия для прецизионного орошения / А. Н. Бабичев, В. А. Монастырский, В. И. Ольгаренко, Р. В. Скиданов, В. В. Подлипов // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2019. № 1(73). С. 195–199. EDN: DWEWYJ.

7. Выбор оптимального варианта полива дождевальной машиной фронтального или кругового действия и расчет параметров орошения («VOVDM.xlsx»): свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № 2019614494 / Ольгаренко Г. В., Булгаков В. И., Капустина Т. А., Замаховский М. П.; правообладатель Всерос. науч.-исслед. ин-т систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга». Заявка № 2019613207; заявл. 27.03.19; опубл. 05.04.19, Бюл. № 4. 1 с.

8. Назаркин Э. Е. Сравнение существующих способов регулирования работы центробежных насосов // Аллея науки. 2017. Т. 2, № 10. С. 721–736. EDN: ZASYQL.

9. Назаркин Э. Е., Сушко В. В., Померанцев О. Н. Регулирование работы центробежного насоса путем подачи воздуха во всасывающий трубопровод // Природообустройство. 2017. № 4. С. 15–20. EDN: ZGUVKH.

10. Аверьянов А. О. Общие схемы и способы регулирования работы насосов при повышении напора // Молодой ученый. 2023. № 3(450). С. 68–71. EDN: CYETSR.

11. Александров В. Ю., Климовский К. К., Карпушин В. В. Регулирование режимов работы центробежных насосов // Вестник машиностроения. 2013. № 3. С. 25–30. EDN: RAVONT.

12. Якубчик П. П. Современные способы регулирования работы центробежных насосов // Новые достижения в области водоснабжения, водоотведения, гидравлики и охраны водных ресурсов: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 210-летию со дня основания Петербург. гос. ун-та путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, 13–15 нояб. 2019 г. СПб.: Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I, 2021. С. 85–88. EDN: DIFOIA.

13. Надуткин Л. Д., Кужахметов Г. З. Применение электрических двигателей для насосной станции // Приоритеты мировой науки: новые подходы и актуальные исследования: сб. науч. тр. по материалам XXV Междунар. науч.-практ. конф., г. Анапа, 31 янв. 2022 г. Анапа: Науч.-исслед. центр экон. и соц. процессов, 2022. С. 116–120. EDN: NMMITH.

14. Кожухова А. В., Худокормов В. В. Применение частотного регулирования электродвигателя насоса для привода исполнительного оборудования // Символ науки. 2016. № 11. С. 92–94.

15. Усынина А. Э., Гаврилкин А. В. Повышение эффективности работы насосных станций систем водоснабжения путем оптимизации управления насосов регулированием привода // Потенциал интеллектуально одаренной молодежи – развитию науки и образования: материалы V Междунар. науч. форума молодых ученых, студентов и школьников, г. Астрахань, 26–29 апр. 2016 г. Астрахань: Астрахан. гос. архитектур.-строит. ун-т, 2016. С. 189–191. EDN: WLEANF.

16. Мадхадимов М. М., Абдулхаев З. Э., Сатторов А. Х. Регулирование работы центробежных насосов с изменением частоты вращения // Актуальные научные исследования в современном мире. 2018. № 12-1(44). С. 83–88. EDN: YWVBCH.

17. Пат. 2758326 Российская Федерация, МПК E 21 B 43/12. Способ регулирования режима работы скважины, оборудованной установкой электроцентробежного насоса, в системе межскважинной перекачки / Ахмадиев Р. Н., Иванов В. А., Артюхов А. В., Латфуллин Р. Р., Минекаев Р. М.; заявитель и патентообладатель Татнефть им. В. Д. Шашина. № 2021110035; заявл. 12.04.21; опубл. 28.10.21, Бюл. № 31. 7 с. EDN: JCBJVP.

18. Воеводин О. В., Кожанов А. Л. Современные задвижки с мягкими запорными элементами для трубопроводов мелиоративных систем // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия [Электронный ресурс]. 2024. Т. 93, № 2. С. 90–105. URL: <https://www.rosniipm-sm1.ru/article?n=292>. EDN: VIACWE.

19. Проектирование малозумного дросселирующего участка для запорно-регулирующей арматуры / А. Н. Крючков, М. А. Ермилов, М. В. Баляба, Е. Н. Ермилова, А. Н. Видяскина // Динамика и виброакустика. 2022. Т. 8, № 4. С. 6–13. DOI: 10.18287/2409-4579-2022-8-4-6-13. EDN: ORQJKP.

20. А. с. 1571302 СССР, МПК F 04 D 15/00. Способ регулирования режима работы насоса с электродвигателем: № 4396822 / К. А. Любицкий, Л. М. Шифрин, Я. Л. Духовный, А. М. Коростылев (СССР). № 4396822/25-29; заявл. 25.03.88; опубл. 15.06.90, Бюл. № 22. 3 с.

21. А. с. 1724946 СССР, МПК F 04 D 15/00. Способ регулирования режима работы насоса / С. Г. Беляев, Д. А. Кариев, А. М. Маковский (СССР). № 4396822/25-29; заявл. 25.03.88; опубл. 07.04.92, Бюл. № 13. 3 с.

22. Пат. 2334898 Российская Федерация, МПК F 04 D 15/00. Способ регулирования режимов работы насосных станций / Хлопенков П. Р., Краснов А. В.; заявитель и патентообладатель Науч.-произв. об-ние гидравл. машин. № 2006141292/06; заявл. 22.11.06; опубл. 27.09.08, Бюл. № 27. 6 с.

23. Пат. 2230938 Российская Федерация, МПК F 04 D 15/00, F 04 D 13/10, E 21 B 43/12. Способ эксплуатации погружных центробежных насосных агрегатов в группе скважин и устройство для его осуществления / Семченко П. Т., Гордон И. А.; заявители и патентообладатели Семченко П. Т., Гордон И. А. № 2003106437/06; заявл. 23.12.91; опубл. 20.12.95, Бюл. № 11. 6 с.

24. А. с. 1229440 СССР, МПК F 04 D 15/00. Устройство автоматического управления насосной станцией / Б. С. Евдокимов, В. Г. Кистень (СССР). № 3757599/25-06; заявл. 21.06.84; опубл. 07.05.86, Бюл. № 17. 3 с.

25. Пат. 2230938 Российская Федерация, МПК F 04 D 15/00. Способ регулировки работы системы лопастных нагнетателей при переменной нагрузке / Николаев В. Г.; заявитель и патентообладатель В. Г. Николаев. № 2003106437/06; заявл. 11.03.03; опубл. 20.06.04, Бюл. № 17. 4 с.

References

1. Soloviev D.A., Zhuravleva L.A., Soloviev V.A., Kuznetsov R.N., 2019. *Sovershenstvovanie tekhnologii poliva dozhdeval'nymi mashinami krugovogo deystviya «KASKAD»* [The improvement of technological methods of irrigation by sprinkling machines of circular actions “Cascade”]. *Nauchnaya zhizn'* [Scientific Life], no. 1, pp. 57-65, EDN: HDDVJO. (In Russian).

Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2024. Т. 94, № 3. С. 105–124.
Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture. 2024. Vol. 94, no. 3. P. 105–124.

2. Soloviev D.A., Zhuravleva L.A., 2019. *Resursosberezhenie pri proektirovanii i ekspluatatsii dozhdeval'nykh mashin krugovogo deystviya* [Resource saving in the design and operation of sprinklers of circular rotation]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agrarian Scientific Journal], no. 8, pp. 81-88, DOI: 10.28983/asj.y2019i8pp81-88, EDN: EEWTCR. (In Russian).

3. Kupriyanov A.A., 2019. *Sovershenstvovanie konstruktсии dozhdeval'noy mashiny krugovogo deystviya* [Improving the design of a pivot irrigation machine]. *Nauka i molodezh': sb. nauch. tr. Vyp. 6. Innovatsii v sovremennom agropromyshlennom komplekse* [Science and Youth: Collection of Scientific Papers. Iss. 6. Innovations in the Modern Agro-Industrial Complex]. Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A. K. Kortunov Donskoy SAU, Novocherkassk, pp. 13-19, EDN: TMNOFC. (In Russian).

4. Prochiy D.V., Volkova E.A., Korzhov V.I., 2023. *Ispol'zovanie elementov modelirovaniya raboty meliorativnykh nasosnykh stantsiy pri perekhodnykh gidravlicheskikh rezhimakh* [Use of operation simulation elements of the reclaiming pumping stations under transient hydraulic modes]. *Melioratsiya kak drayver modernizatsii APK v usloviyakh izmeneniya klimata: materialy IV Mezhdunar. nauchno-prakticheskoy internet-konf.* [Land Reclamation as a Driver for the Modernization of the Agro-Industrial Complex in the Context of Climate Change: Proc. of the IV International Scientific-Practical Internet Conf.]. Novocherkassk, Lik Publ., pp. 59-64, EDN: QQENNM. (In Russian).

5. Kozhanov A.L., Voevodin O.V., 2021. [Drainage and humidification systems in flat areas using frontal and frontal-circular sprinklers]. *Melioratsiya i gidrotehnika*, vol. 11, no. 3, pp. 95-108, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1216>, DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-3-95-108, EDN: GZRQZT. (In Russian).

6. Babichev A.N., Monastyrsky V.A., Olgarenko V.I., Skidanov R.V., Podlipnov V.V., 2019. *Sistema upravleniya shirokozhvatnoy dozhdeval'noy mashiny krugovogo deystviya dlya pretsizionnogo orosheniya* [Control system for a wide-coverage pivot irrigation machine for precision irrigation]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], no. 1(73), pp. 195-199, EDN: DWEWYJ. (In Russian).

7. Olgarenko G.V., Bulgakov V.I., Kapustina T.A., Zamakhovsky M.P., 2019. *Vybor optimal'nogo varianta poliva dozhdeval'noy mashinoy frontal'nogo ili krugovogo deystviya i raschet parametrov orosheniya («VOVDM.xlsx»)* [Selecting the Optimal Option for Irrigation with a Frontal or Pivot Sprinkler and Calculating Irrigation Parameters (“VOVDM.xlsx”)]. Certificate of State Registration of Computer Program, no. 2019614494. (In Russian).

8. Nazarkin E.E., 2017. *Sravnenie sushchestvuyushchikh sposobov regulirovaniya raboty tsentrobezhnykh nasosov* [Comparison of existing methods for regulating the operation of centrifugal pumps]. *Alleya nauki* [Alley of Science], vol. 2, no. 10, pp. 721-736, EDN: ZASYQL. (In Russian).

9. Nazarkin E.E., Sushko V.V., Pomerantsev O.N., 2017. *Regulirovanie raboty tsentrobezhnogo nasosa putem podachi vozdukha vo vsasyvayushchiy truboprovod* [Regulation of the centrifugal pump operation by air supply into the suction pipeline]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 4, pp. 15-20, EDN: ZGUVKH. (In Russian).

10. Averyanov A.O., 2023. *Obshchie skhemy i sposoby regulirovaniya raboty nasosov pri povyshenii napora* [General schemes and methods for regulating the operation of pumps with increasing pressure]. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], no. 3(450), pp. 68-71, EDN: CYETSR. (In Russian).

11. Aleksandrov V.Yu., Klimovsky K.K., Karpushin V.V., 2013. *Regulirovanie rezhimov raboty tsentrobezhnykh nasosov* [Regulation of operating modes of centrifugal pumps]. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], no. 3, pp. 25-30, EDN: RAVONT. (In Russian).

12. Yakubchik P.P., 2021. *Sovremennye sposoby regulirovaniya raboty tsentrobezhnykh*

nasosov [Modern methods of regulating the operation of centrifugal pumps]. *Novye dostizheniya v oblasti vodosnabzheniya, vodootvedeniya, gidravliki i okhrany vodnykh resursov: sb. statey Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashchennoy 210-letiyu so dnya osnovaniya Peterburg. gos. un-ta putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I* [New Achievements in the Field of Water Supply, Sanitation, Hydraulics and Water Resources Protection: collection of articles of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 210th Anniversary of the Foundation of St. Petersburg State University of Railway Engineering of Emperor Alexander I]. St. Petersburg, pp. 85-88, EDN: DIFOIA. (In Russian).

13. Nadutkin L.D., Kuzhakhmetov G.Z., 2022. *Primenenie elektricheskikh dvigateley dlya nasosnoy stantsii* [Application of electric motors for a pumping station]. *Prioritety mirovoy nauki: novye podkhody i aktual'nye issledovaniya: sb. nauch. trudov po materialam XXV Mezhdunar. nauchno-prakt. konferentsii* [Priorities of World Science: New Approaches and Current Research: Collection of Scientific Papers Based on the Materials of the XXV International Scientific and Practical Conference]. Anapa, Research Center for Economic and Social Processes, pp. 116-120, EDN: NMMITH. (In Russian).

14. Kozhukhova A.V., Khudokormov V.V., 2016. *Primenenie chastotnogo regulirovaniya elektrodvigatelya nasosa dlya privoda ispolnitel'nogo oborudovaniya* [Application of frequency regulation of the pump electric motor for driving the executive equipment]. *Simvol nauki* [Science Symbol], no. 11, pp. 92-94. (In Russian).

15. Usynina A.E., Gavrilkin A.V., 2016. *Povyshenie effektivnosti raboty nasosnykh stantsiy sistem vodosnabzheniya putem optimizatsii upravleniya nasosov regulirovaniem privoda* [Improving the efficiency of pumping stations of water supply systems by optimizing pump control by adjusting the drive]. *Potentsial intellektual'no odarennoy molodezhi – razvitiyu nauki i obrazovaniya: materialy V Mezhdunar. nauch. foruma molodykh uchenykh, studentov i shkol'nikov* [The Potential of Intellectually Gifted Youth – For the Development of Science and Education: Proc. of the V International Scientific Forum of Young Scientists, Students and Schoolchildren]. Astrakhan, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, pp. 189-191, EDN: WLEAHF. (In Russian).

16. Madkhadimov M.M., Abdulkhaev Z.E., Sattorov A.Kh., 2018. *Regulirovaniya raboty tsentrobezhnykh nasosov s izmeneniem chastoty vrashcheniya* [Central pump case adjustment by changing the rotation frequency]. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremenom mire* [Actual Scientific Research in the Modern World], no. 12-1(44), pp. 83-88, EDN: YWVBCH. (In Russian).

17. Akhmadiev R.N., Ivanov V.A., Artyukhov A.V., Latfullin R.R., Minekaev R.M., 2021. *Sposob regulirovaniya rezhima raboty skvazhiny, oborudovannoy ustanovkoy elektrotsentrobezhnogo nasosa, v sisteme mezhskvazhinnoy perekachki* [Method for Regulating the Operating Mode of a Well Equipped with an Electric Centrifugal Pump Unit in an Interwell Pumping System]. Patent RF, no. 2758326, EDN: JCBJVP. (In Russian).

18. Voevodin O.V., Kozhanov A.L., 2024. [Modern valves with soft shut-off elements for pipelines of melioration systems]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya*, vol. 93, no. 2, pp. 90-105, available: <https://www.rosniipm-sm1.ru/article?n=292>, EDN: VIACWE. (In Russian).

19. Kryuchkov A.N., Ermilov M.A., Balyaba M.V., Ermilova E.N., Vidyaskina A.N., 2022. *Proektirovanie maloshumnogo drosseliruyushchego uchastka dlya zaporno-reguliruyushchey armatury* [Design of a low-noise throttle section for shut-off control valves]. *Dinamika i vibroakustika* [Dynamics and Vibroacoustics], vol. 8, no. 4, pp. 6-13, DOI: 10.18287/2409-4579-2022-8-4-6-13, EDN: ORQJKP. (In Russian).

20. Lyubitsky K.A., Shifrin L.M., Dukhovny Ya.L., Korostylev M.A., 1988. *Sposob regulirovaniya rezhima raboty nasosa s elektrodvigatелем* [Method for Regulating the Operating Mode of a Pump with an Electric Motor]. Author's Certificate USSR, no. 4396822. (In Russian).

Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2024. Т. 94, № 3. С. 105–124.
Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture. 2024. Vol. 94, no. 3. P. 105–124.

21. Belyaev S.G., Kariev D.A., Makovsky A.M., 1988. *Sposob regulirovaniya rezhima raboty nasosa* [Method of Controlling Pump Working Mode]. Author's Certificate USSR, no.1724946. (In Russian).

22. Khlopenkov P.R., Krasnov A.V., 2006. *Sposob regulirovaniya rezhimov raboty nasosnykh stantsiy* [Method for Regulating the Operating Modes of Pumping Stations]. Patent RF, no. 2334898. (In Russian).

23. Semchenko P.T., Gordon I.A., 1991. *Sposob ekspluatatsii pogruzhnykh tsentrobezhnykh nasosnykh agregatov v gruppe skvazhin i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [Method of Operation of Well with Submersible Centrifugal Pump and Device for Realization of This Method]. Patent RF, no. 2230938. (In Russian).

24. Evdokimov B.S., Kisten V.G., 1984. *Ustroystvo avtomaticheskogo upravleniya nasosnoy stantsiey* [Automatic Control Device for a Pumping Station]. Author's Certificate USSR, no. 1229440. (In Russian).

25. Nikolaev V.G., 2003. *Sposob regulirovki raboty sistemy lopastnykh nagnetateley pri peremennoy nagruzke* [Method of Adjusting the Operation of a Vane Supercharger System under Variable Load]. Patent RF, no. 2230938. (In Russian).

Информация об авторах

О. В. Воеводин – ведущий научный сотрудник, кандидат сельскохозяйственных наук, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация, Vovteh@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-1098-2979;

А. Л. Кожанов – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация, AntonKozhanov1983@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-4240-1967.

Information about the authors

O. V. Voevodin – Leading Researcher, Candidate of Agricultural Sciences, Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation, Vovteh@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-1098-2979;

A. L. Kozhanov – Leading Researcher, Candidate of Technical Sciences, Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation, AntonKozhanov1983@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-4240-1967.

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

Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.

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

All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 13.09.2024; одобрена после рецензирования 24.10.2024; принята к публикации 14.11.2024.

The article was submitted 13.09.2024; approved after reviewing 24.10.2024; accepted for publication 14.11.2024.