

УДК 626.83

ОБОСНОВАНИЕ ПОДХОДА К ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЮ ПРИ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ ПО НАПОРУ ВОДОПОДАЧЕ НА ОРОШАЕМЫЙ УЧАСТОК

Ветрова Н.М.¹, Степаненко К.С.²

¹ Институт «Академия строительства и архитектуры», ФГАОУ ВО КФУ им. В.И.Вернадского, 295943, г. Симферополь, ул. Киевская, 181, e-mail: хаос.vetrova.03@mail.ru

² Институт «Академия строительства и архитектуры», ФГАОУ ВО КФУ им. В.И.Вернадского, 295943, г. Симферополь, ул. Киевская, 181, e-mail: kstepanenko_89@mail.ru

Аннотация. Важнейшим элементом в обеспечении работы любой оросительной системы является комплекс сооружений насосной станции. Определение режимов работы НС и наиболее эффективных технологических схем водоподачи на орошаемые участки будет способствовать обеспечению энергосбережения и экологической безопасности. В статье обоснована необходимость, определены основные методы и способы энергосбережения при работе оросительных насосных станций.

Цель. Анализ эффективности применения энергосберегающей технологической схемы водоподачи на орошаемый участок.

Методы. Системный подход; вычислительный эксперимент (метод прямых вычислений); анализ; метод сравнительных оценок.

Результаты. Учитывая задачи энергосбережения при работе оросительных насосных станций, рассмотрена схема дифференцированной по напору водоподачи на орошаемый участок по четырем вариантам. Проведено технико-экономическое сравнение эффективности каждого варианта схемы дифференцированной по напору водоподачи на орошаемый участок. По экономическим показателям определен наиболее эффективный вариант с заменой насосных агрегатов на более мощные с использованием частотных преобразователей, который позволит достичь экономии электроэнергии около 19% по сравнению с базовым вариантом.

Ключевые слова: насосная станция; технологическая схема; дифференцированная водоподача; регулирующий бассейн; энергосбережение

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для всех отраслей хозяйства наиболее актуальной является проблема энергосбережения. Особо остро эта проблема ощущается в сфере водного хозяйства на орошаемых территориях. Важнейшим элементом в обеспечении работы любой оросительной системы является комплекс сооружений насосной станции, поэтому от надежности водоподачи, осуществляемой насосной станцией, зависит работоспособность и эффективность эксплуатации всей оросительной системы. При этом наибольшие затраты электроэнергии происходят при работе оросительных насосных станций малой производительности (НС), осуществляющих подачу воды на орошаемые участки. Определение режимов работы НС и наиболее эффективных технологических схем водоподачи на орошаемые участки будет способствовать обеспечению энергосбережения и экологической безопасности при природопользовании.

Одной из основных задач проведения исследований по оптимизации работы оросительных НС по основным факторам влияния и показателям работы, представленных на рисунке 1, является снижение энергоемкости водоподачи.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ; МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Подача воды на орошаемые участки в большинстве случаев выполняется по следующей схеме: из открытого источника (в том числе оросительного канала определенного порядка, включая межхозяйственную и внутрихозяйственную сеть) с помощью насосной станции вода подается в закрытый напорный трубопровод (обычно в одну, реже в две нитки), по которому вода транспортируется непосредственно к орошаемому участку, где происходит разделение потока по распределительным трубопроводам и транспортирование воды к дождевальным машинам. Преобразование воды из состояния водного потока в состояние почвенной влаги происходит в подавляющем большинстве случаев путем распыления воды в дождь с помощью дождевальных аппаратов и дальнейшего всасывания искусственного дождя почвой.

Поэтому общие энергозатраты при орошении состоят из двух основных составляющих:

энергозатраты на транспортирование воды от источника до орошаемого участка, включая распределение воды по участку, и энергозатраты непосредственно на поливном участке на переход воды в состояние почвенной влаги. При дождевании именно на орошаемом участке происходят основные затраты электроэнергии на распыление воды и именно на этом участке технологического процесса водоподдачи и водораспределения необходима и возможна существенная экономия электроэнергии [1].



Рис.1. Блок-схема основных принципов оптимизации работы оросительных НС

Однако при использовании существующих дождевальных машин и сети трубопроводов возможны и необходимы действия по совершенствованию системы «НС – оросительная сеть». При оптимизации этой системы одна из главных задач – соответствие режимов работы.

Существующие нормативные режимы работы НС регламентированы с учетом подбора насосных агрегатов по методике СП 100.13330.2016 [13], где указано, что количество насосных агрегатов зависит от максимальной подачи насосной станции; отношения величины максимальной подачи к величине минимальной подачи; значения максимального расчетного напора.

Возможны два способа регулирования подачи НС на основном (поливном) режиме:

- ступенчатое регулирование: подача изменяется за счет числа работающих насосных агрегатов;
- плавно-ступенчатое регулирование: подача изменяется как за счет числа работающих насосных агрегатов, так и за счет регулирования подачи отдельных насосных агрегатов.

При данной методике положительным является то, что насосы принимаются однотипными и одинаковыми по марке, которая позволяет им резервировать друг друга и довольно просто автоматизировать технологический процесс.

При целом ряде достоинств данная методика имеет ряд существенных недостатков, а именно:

- расчетная подача для подбора насосов равна отношению максимальной подачи к рекомендуемому [13] количеству насосов, расчетный напор равен максимальному, т.е. не учитываются их фактические значения в каждый эксплуатационный период. При этом регулирование производится путем дросселирования, т.е. количественным способом, который не позволяет экономить электроэнергию при работе насоса;

- с увеличением числа параллельно работающих насосов суммарная фактическая подача возрастает непропорционально увеличению количества насосов. Это связано с тем, что с увеличением числа параллельно работающих насосов увеличивается напор каждого из насосов и уменьшается подача каждого из насосов (единичная подача), и, как следствие, уменьшается КПД

каждого насоса [9].

В своих работах Захаров Р.Ю. предложил методику подбора насосов по показателям эксплуатационных режимов [3, 6]. Эксплуатационный режим НС – совокупность основных эксплуатационных показателей работы НС, характеризующих постоянством в течение определенного интервала времени в пределах оросительного сезона. Эксплуатационные режимы зависят от количества и схемы одновременно работающих дождевальных машин и выражаются значениями подачи, равной суммарной производительности одновременно работающих дождевальных машин с учетом КПД сети, и соответствующего этому значению подачи фактического требуемого напора по характеристике сети [3].

Вопросами энергосбережения при работе насосных станций занимались такие ученые как Ю.С. Южумова, Д. В. Николаенко, В. Б. Панов, С. А. Тарасьянц [8], С.С.Елисеев [2]. Состав и расположение гидротехнических сооружений мелиоративных насосных станций рассматривал в своей работе А.Л. Кожанов [7]. Оценку надежности и экологической безопасности анализировал в работах [11, 12] А.И. Пашенцев.

Одним из способов оптимизации работы насосной станции является дифференциация подачи воды от источника к орошаемому участку, данной тематикой занимались Р.Ю. Захаров и Т.В. Зуева, по результатам работы получен Патент на полезную модель «Способ подачи воды в оросительную сеть» [10].

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основной целью исследования является анализ эффективности применения энергосберегающей технологической схемы водоподдачи на орошаемый участок. Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- обосновать схему водоподдачи на орошаемый участок с дифференцированием по напору с учетом энергосбережения;
- определить основные режимы работы НС с учетом подбора насосов и способов регулирования;
- выполнить технико-экономическое сравнение вариантов схемы дифференцированной водоподдачи с учетом существующей нормативной методики водоподдачи [13];
- выбрать оптимальный вариант по критерию минимизации энергозатрат.

Объектом исследования является система водоподдачи на орошаемый участок.

Предметом исследования являются технологическая схема водоподдачи на орошаемый участок с дифференциацией по напору.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Основным способом дифференциации, обеспечивающим существенное снижение энергозатрат является дифференцированная по напору водоподдача.

В этом случае подача воды на орошаемый участок осуществляется дифференцированно при помощи регулирующего бассейна по следующей схеме, представленной на рисунке 2: сначала вода забирается из источника и подается перекачивающей насосной станцией (НС №1) по напорному трубопроводу в регулирующий бассейн, расположенный близи от орошаемого участка, затем подкачивающей насосной станцией (НС №2) подается из регулирующего бассейна на орошаемый участок. При этом меняется технологическая схема работы НС №1, которая переводится из режима подкачивающей в режим перекачивающей. Подбор насосно-силового оборудования и эксплуатация НС №2 будет осуществляться по показателям эксплуатационных режимов, в том числе с учетом дифференциации по подаче.

Данная схема подачи воды на орошаемый участок позволяет:

- уменьшить количество работающих насосов на перекачивающей насосной станции за счет более равномерной работы;
- использовать насосы и оборудование существующих насосных станций с большей эффективностью и большей надежностью за счет резервирования насосами, которые не берут участие в технологическом процессе;
- снизить суммарные эксплуатационные расходы перекачивающих и подкачивающих насосных станций за счет более точного соответствия показателям эксплуатационных режимов, в том числе снижения затрат на потребленную электроэнергию;

- использовать новые технологии регулирования работы насосов, в том числе частотные преобразователи;
- улучшить микроклимат орошаемых территорий, а также территорий, которые прилегают к орошаемым участкам.

Наличие в структуре водоподачи регулирующего бассейна позволит:

- увеличить эффективность и надежность водоподачи за счет накопления резервного объема;
- уменьшить непроизводительные сбросы воды за счет более стабильного режима управления водоподачей;
- уменьшить годовые суммарные эксплуатационные затраты на оросительной системе за счет уменьшения суммарных объемов перекачивания воды и более точного соответствия параметрам эксплуатационных режимов насосных станций, в том числе с учетом использования регулирования работы насосов;

При анализе эффективности рассматриваемой модели было рассмотрено несколько вариантов технологических схем работы НС №1:

1 вариант: изменение режима работы в сторону увеличения подачи и уменьшения количества дней работы без изменения количества и марок насосных агрегатов;

2 вариант: работа насосной станции с использованием частотных преобразователей без изменения количества и марок насосных агрегатов;

3 вариант: замена насосных агрегатов на более мощные, которые обеспечат подачу воды в регулирующей бассейн за меньшее количество дней работы;

4 вариант: замена насосных агрегатов на более мощные с использованием частотных преобразователей.

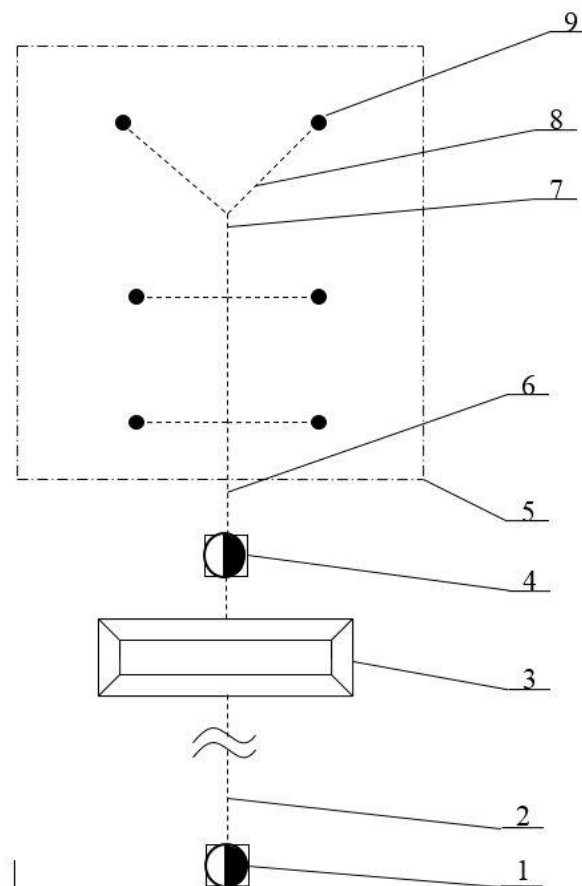


Рис.2. Схема дифференцированной по напору водоподачи насосной станцией на орошаемый участок: 1 – перекачивающая насосная станция (НС№1); 2 – напорный трубопровод; 3 – регулирующий бассейн; 4 - подкачивающая насосная станция (НС№2); 5 - граница орошаемого участка; 6 - главный напорный трубопровод; 7 - распределительный трубопровод; 8 - полевой трубопровод; 9 - узел подключения дождевальных машин.

За базовый вариант для сравнения принят существующий режим работы насосной станции,

рассчитанный при подборе и работе насосных агрегатов по методике [13].

При всех вариантах работы НС №1, ее напор зависит от геодезической высоты подъема H_r . Месторасположение регулирующего бассейна и выбор параметров НС №1 и НС №2 осуществляется взаимосвязано.

Режим работы НС №2, которая находится после регулирующего бассейна, и непосредственно подает воду на орошаемый участок, рассчитывается по методике показателей эксплуатационных режимов [3, 4]. Суть методики заключается в том, что для каждого периода работы насосной станции (эксплуатационного режима) подбирается насос, который обеспечивает требуемую подачу и напор. Регулирование работы насосных агрегатов происходит с применением частотных преобразователей.

Комплектация насосных станций, принятая при проведении расчетов представлена в таблице 1.

Таблица 1. Комплектация насосных станций, принятая при проведении расчетов

| Параметры | Базовый вариант | 1 вариант | | | 2 вариант | | | 3 вариант | | | 4 вариант | | |
|---------------------------|-----------------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| | | НС №1 | НС№2 | | НС №1 | НС№2 | | НС №1 | НС№2 | | НС №1 | НС№2 | |
| Марка насоса | Д630-90 | Д630-90 | Д320-70 | Д800-57 | Д630-90 | Д320-70 | Д800-57 | Д1250-65 | Д320-70 | Д800-57 | Д1250-65 | Д320-70 | Д800-57 |
| Количество насосов z, шт. | 3 | 3 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

При определении режима работы НС №1 по 1 варианту (изменение режима работы в сторону увеличения подачи и уменьшения количества дней работы) было проанализировано несколько значений подачи насосной станции в i -й период, значения которой увеличивались с применением коэффициентов от 1.05 до 1.2. При этом происходило уменьшение количества дней работы насосной станции и снижение потребления электроэнергии. Годовое потребление электроэнергии НС №1 в процентах от базового варианта при различных коэффициентах увеличения подачи НС №1 представлены на рисунке 3.

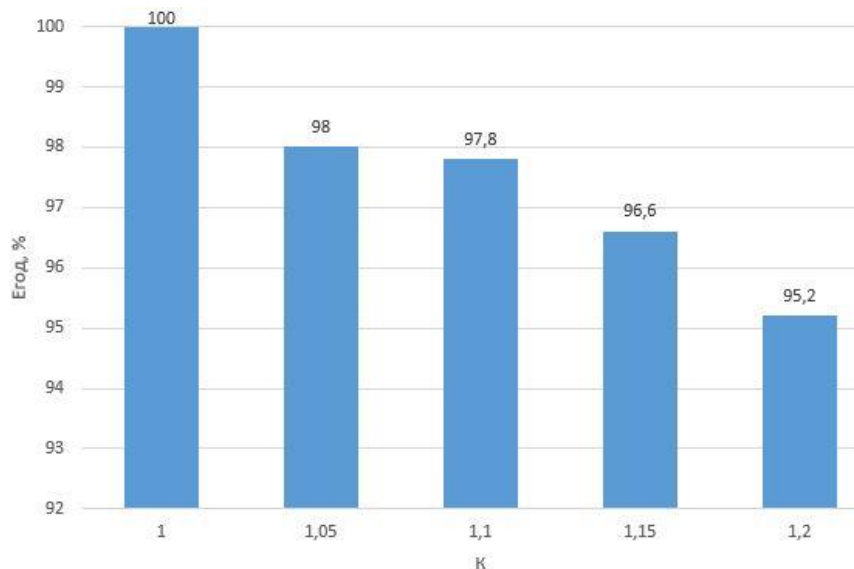


Рис.3. Годовое потребление электроэнергии НС №1 в процентах от базового варианта при различных коэффициентах увеличения подачи НС №1.

При определении режима работы НС №1 по 2 варианту использовались методика расчета работы насосной станции с использованием частотного преобразователя [4].

Особенности подбора насосов по третьему и четвертому вариантам заключается в следующем:

1. Подбор насоса осуществляем из условия, чтобы он мог обеспечить подачу в максимальный период.

2. В периоды, когда требуемая подача насосной станции $Q_{нс}$ меньше минимально допустимой подачи насоса согласно паспортным данным, насос работает с подачей равной минимальной подаче насоса по паспортным данным $Q_{н \min}$.

3. В периоды, когда требуемая подача насосной станции находится в промежутке между $Q_{н \min}$ и $Q_{н \max}$, насос работает с подачей равной подаче насосной станции $Q_{нс}$.

4. В периоды, когда насос работает с подачей $Q_{н \min}$, требуемый объем воды подается за меньшее количество дней и аккумулируется в бассейне.

5. Регулирование работы насоса в четвертом варианте производится с помощью частотных преобразователей.

Для оросительных насосных станций III категории надежности малой и средней производительности, оборудованных центробежными горизонтальными насосами, стоимость годовой потребленной электроэнергии определяется по формуле [9]:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = a \cdot \sum_{i=1}^n N_{ij} \cdot \Delta t_j / (\eta_э \cdot \eta_с), \text{ руб.}, \quad (1)$$

где a – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб.;

N_{ij} – мощность потребленная i -м насосным агрегатом, кВт, в интервале периода постоянной работы Δt_j , ч;

$\eta_э \cdot \eta_с$ – произведение КПД электродвигателя и подводящих электрических сетей.

Аналитически количественно величина экономии затрат на электроэнергию за год для насосной станции в целом с учетом загрузки насосов может определяться по формуле [9]:

$$\Delta \mathcal{E} = a \cdot \sum_{j=1}^n \Delta N_{НСj} \cdot \Delta t_j / (\eta_э \cdot \eta_с), \text{ руб.}, \quad (2)$$

где экономия затрат мощности насосной станции $N_{НСj}$ в j -й эксплуатационный период (режим):

$$\Delta N_{НСj} = z_j \cdot 981 \cdot Q_1 \cdot \Delta H_j / \eta_1, \text{ кВт}, \quad (3)$$

где z_j - количество работающих насосов в j -й эксплуатационный режим, шт.;

Q_1 - единичная подача насосов по классическому методу подбора, которые работают в j -й эксплуатационный режим, м³/с; при одинаковых насосах $Q_1 = Q_{zj} / z_j$;

Q_{zj} - подача j -го эксплуатационного режима;

η_1 - КПД соответствующий единичной подаче, для горизонтальных центробежных насосов (в т.ч. типа Д) принимается $\eta_{1 \text{ ср}} \approx 0,75$;

ΔH_j - разность в напорах насоса: фактического и необходимого по характеристике напорного трубопровода, м; $\Delta H_j = \Delta h_{zj}$, где Δh_{zj} - величина прикрытия задвижки в j -и режим, м.

Дополнительный годовой экономический эффект $\Delta \mathcal{E}_{\text{доп}}$, который возникает при использовании частотных преобразователей вследствие экономии затрат на электроэнергию, определяется по формуле [5]:

$$\mathcal{E}_{\text{доп}} = N_{\text{эл}} \cdot T_{100} \cdot a - \sum (N_{\text{эл}} \cdot V_{ni}^3 \cdot T_{ni} \cdot a), \text{ руб.}, \quad (4)$$

где $N_{\text{эл}}$ – расчетная мощность электродвигателя, кВт;

T_{100} – расчетное время работы на исходной (100%) частоте, ч;

a – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб/(кВт·ч);

V_{ni} - i -я частота вращения в долях от исходной;

T_{ni} - время работы с частотой V_{ni} , ч.

Суммарное годовое потребление НС №1 и №2 в процентах от базового варианта представлено на рисунке 4.

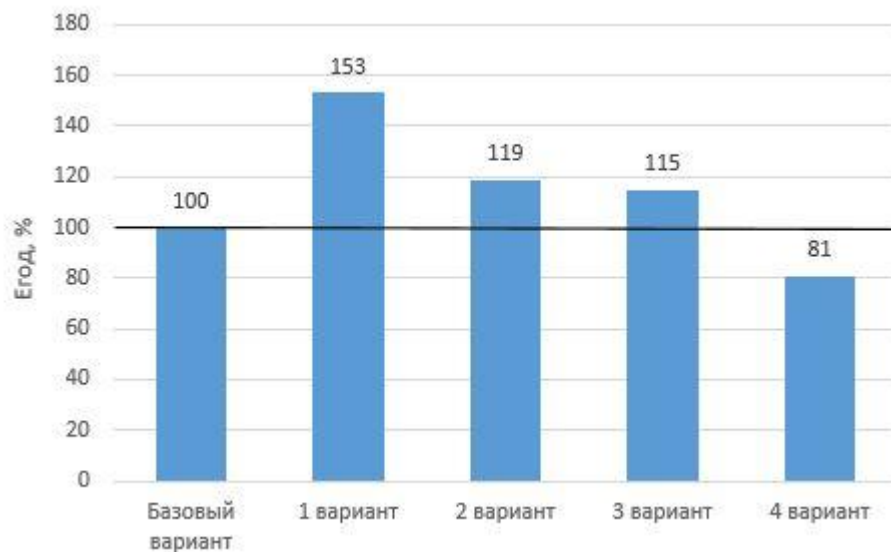


Рис.4. Суммарное годовое потребление электроэнергии НС №1 и НС №2 в процентах от базового варианта.

При сравнении затрат электроэнергии по указанным четырем вариантам с базовым (рис. 4) можно сделать вывод, что наиболее экономически выгодным будет четвертый вариант. А именно, при замене на НС №1 насосов более производительными, наличии регулирующего бассейна, работе НС №2 по показателям эксплуатационных режимов, и регулировании обеих насосных станций с использованием частотных преобразователей, снижение годовых суммарных затрат электроэнергии составит по сравнению с базовым вариантом 18,54%. Экономия потребляемого энергоресурса обеспечивается тем, что НС №1 будет работать меньшее количество дней, перекачивая необходимый за период объем воды и аккумулируя его в регулирующем бассейне, а режимы работы НС №2 являются более экономичными за счет использования частотных преобразователей.

ВЫВОДЫ

1. Учитывая задачи энергосбережения при работе оросительных насосных станций, рассмотрена схема дифференцированной по напору водоподачи на орошаемый участок по четырем вариантам (табл. 1).

2. Проведено технико-экономическое сравнение эффективности каждого варианта схемы дифференцированной по напору водоподачи на орошаемый участок (рис. 4).

3. По экономическим показателям определен наиболее эффективный вариант – вариант 4 с заменой насосных агрегатов на более мощные с использованием частотных преобразователей, который позволит достичь экономии электроэнергии около 19% по сравнению с базовым вариантом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Закусилов, Н.А. Актуальные вопросы повышения энергоэффективности оросительных систем: коллективная монография / Н. А. Закусилов, Р. Ю. Захаров, Т. В. Зуева, Д. В. Лунёв. — Симферополь: СОНАТ, 2009. — 128 с. (ISBN 978-966-2178-35-7)

2. Елисеев, С. С. Сравнение энергозатрат этапов водоподачи и водораспределения процесса орошения / С. С. Елисеев, А. В. Ключиков, Ю. Н. Гречук // Актуальные проблемы энергетики АПК : Материалы XIV Национальной научно-практической конференции с международным участием, Саратов, 28 апреля 2023 года / Под общей редакцией С.М. Бакирова. – Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 2023. – С. 87-91. – EDN LSCZGT.

3. Захаров, Р. Ю. Экономическая эффективность выбора количества и марок насосных агрегатов по показателям эксплуатационных режимов оросительных насосных станций / Р. Ю. Захаров // Строительство и техногенная безопасность. – 2004. – Вып.9. – С.143-145.

4. Захаров, Р.Ю. Методика подбора насосов для оросительных насосных станций по показателям эксплуатационных режимов / Р.Ю. Захаров // Труды междунар. научно-техн. к онфер. «СИНТ’ОЗ», ФГУП «Турбонасос», Воронеж, 2003. – С.113-115.
5. Захаров, Р.Ю. Исследование экономической целесообразности применения частотных преобразователей для регулирования работы насосных агрегатов подкачивающих оросительных насосных станций / Р.Ю. Захаров, Т.В. Зуева // Строительство и техногенная безопасность. – 2006. – №15-16. – С.154-155.
6. Захаров, Р.Ю. Обеспечение экологической безопасности и энергосбережение при работе подкачивающих оросительных насосных станций (на примере водохозяйственного комплекса Автономной республики Крым) [Текст] автореф. дис. канд. тех. наук / Р.Ю. Захаров. – Симферополь: НАПКС, 2005. – 12 с.
7. Кожанов, А. Л. Состав и расположение гидротехнических сооружений мелиоративных насосных станций / А. Л. Кожанов, А. А. Кириленко // Экология и водное хозяйство. – 2023. – Т. 5, № 2. – DOI 10.31774/2658-7890-2023-5-2-40-53. – EDN RGBGYQ.
8. Уржумова, Ю.С. Методы уменьшения потребляемой энергии мелиоративными насосными станциями / Ю. С. Уржумова, Д. В. Николаенко, В. Б. Панов, С. А. Тарасьянц // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2022. – № 3(67). – С. 566–574. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-03-64.
9. Насосы и насосные станции / под ред.В.Ф.Чебаевского. М.: Агропромиздат, 1989. – 416 с.
10. Пат. № 32597 Україна, МПК А01G 25/00 (2006). Спосіб подачі води в зрошувальну мережу / Р. Ю. Захаров, Т. В. Зуєва ; Національна академія природоохоронного та курортного будівництва. — № u200714633 ; Заявл. 24.12.2007 ; Опубл. 26.05.2008, Бюл. № 10.
11. Пашенцев, А. И. Совершенствование методического подхода к оценке экологической безопасности сложных линейных систем водоснабжения / А. И. Пашенцев, А. А. Гармидер, И. В. Данилович // Экономика строительства и природопользования. – 2024. – № 1(90). – С. 26-34. – EDN BSNFBM.
12. Пашенцев, А.И. Оценка и обеспечение экологической надежности закрытых оросительных систем [Текст] автореф. дис. канд. тех., наук / А.И. Пашенцев. – Симферополь: КИПКС, 1997. – 16 с.
13. СП 100.13330.2016 «Мелиоративные системы и сооружения»: утв. Министерством строительства и ЖКХ 16.12.2016. ФГБНУ «РосНИИПМ», Москва, 2016.

JUSTIFICATION OF ENERGY SAVING DURING DIFFERENTIATED WATER SUPPLY TO THE IRRIGATED AREA

¹Vetrova N.M., ²Stepanenko K.S.

^{1,2}V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Crimea

Annotation. The most important element in ensuring the operation of any irrigation system is the complex of pumping station facilities. Determining the operating modes of the pumping station and the most effective technological schemes for supplying water to irrigated areas will contribute to energy conservation and environmental safety. The article substantiates the need and identifies the main methods and approaches for energy conservation in irrigation pumping stations.

Purpose. Analysis of the efficiency of using an energy-saving technological scheme for water supply to an irrigated area.

Methods. system approach; computational experiment (direct calculation method); analysis; comparative evaluation method.

Results. Taking into account the tasks of energy saving during the operation of irrigation pumping stations, a scheme of differentiated water supply to the irrigated area by pressure was considered in four variants. A technical and economic comparison of the efficiency of each variant of the scheme of differentiated water supply to the irrigated area was carried out. Based on economic indicators, the most efficient variant was determined, which involves replacing the pumping units with more powerful ones using frequency inverters, resulting in energy savings of approximately 19% compared to the base variant.

Keywords: pumping station; technological scheme; differentiated water supply; regulating pool; energy saving