

## АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИЛОВЫХ АГРЕГАТОВ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ ПО УДЕЛЬНЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

Николенко И.В.

Академия строительства и архитектуры  
ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»,  
Адрес: г. Симферополь, ул. Киевская, 181.  
e-mail: nikoshi@mail.ru

**Аннотация.** Выполнен анализ проблем повышения энергетической эффективности силовых агрегатов насосных станций систем водоснабжения. Проведен анализ понятия энергетической эффективности в применении к силовым агрегатам насосных станций систем водоснабжения и водоотведения. Предложена методика и аналитические зависимости для оценки энергетической эффективности силовых агрегатов по удельным показателям, в том числе при их частотном регулировании. Способ позволяет существенно упростить процесс оценки энергетической эффективности на стадии проектирования насосных станций систем водоснабжения.

**Ключевые слова:** энергетическая эффективность, система водоснабжения, водопроводная сеть, насосный агрегат, удельный расход энергии, частотное регулирование.

### ВВЕДЕНИЕ

Системы подачи и распределения воды являются важнейшим элементом современных систем водоснабжения, которые обеспечивают транспортировку, распределение по территории снабжаемых объектов и доставку к местам отбора необходимого количества воды под требуемым напором в соответствии с нуждами потребителей. В этих системах объектов ЖКХ, промышленных, сельскохозяйственных и энергетических предприятий, насосные станции (НС) являются наиболее ответственными элементами, представляющие собой сложный комплекс механического, гидравлического и энергетического оборудования, трубопроводов, арматуры, контрольно-измерительных приборов и средств автоматизации. Состав сооружений, агрегатов, их конструктивные особенности, тип и число основного и вспомогательного оборудования определяются исходя из принципов рационального использования источников воды, потребляемой энергии, а также минимизации стоимости строительства НС и ее эксплуатации с учётом назначения и предъявляемых к ней технологических требований.

Системы водоснабжения и водоотведения (СВВ) относятся к наиболее энергоёмким объектам ЖКХ, где основными потребителями электроэнергии являются НС. В этих системах в России на перекачку насосными агрегатами чистых и загрязнённых вод ежегодно расходуется 120...130 млрд. кВт-час электроэнергии [1]. В структуре себестоимости на оказание услуг по водоснабжению и водоотведению затраты на электроэнергию могут достигать 50%, в том числе непродуктивные затраты до 20%. Важной составляющей затрат в структуре себестоимости

являются потери воды при ее распределении и транспортировке потребителям, которые могут достигать не менее 30% от общих объемов. Повышенные напоры в сети создают дополнительные потери, что снижает энергетическую эффективность системы в целом [2]. Силовые агрегаты НС являются основными структурными элементами, которые во многом задают эксплуатационные возможности и технический уровень системы водоснабжения в целом, а также существенно определяют энергетические и экономические показатели ее работы. Поэтому вопрос повышения энергетической эффективности насосного оборудования в СВВ является первоочередным [3].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одной из основных задач экономического и социального развития Российской Федерации является разработка и осуществление мероприятий по рациональному и эффективному использованию всех видов ресурсов [4]. Законодательно закрепленные национальные цели по повышению энергетической эффективности российской экономики количественно отражаются в виде снижения к 2020 году энергоёмкости валового внутреннего продукта на 40% по сравнению с 2007 годом при развитии экономики по «инновационному» сценарию, то есть ежегодный рост этого показателя должен быть не менее 3,3% в год. **Энергетическая эффективность** – характеристика, которая соответствует отношению полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, для получения этого эффекта, применительно к продукции либо технологическому процессу [4]. Существует

иерархия показателей энергетической эффективности. На самом верхнем уровне стоит показатель энергоемкости ВВП для государства в целом. На втором уровне показателей потребление энергии анализируется по основным секторам и отраслям экономики. На этом уровне определяются следующие показатели: энергоемкость промышленности, транспорта, ЖКХ и т.п. На третьем уровне оцениваются показатели энергетической эффективности производства различных однотипных видов товаров, работ и услуг в виде специальных удельных показателей энергетической эффективности: удельный расход энергии на подачу 1 м<sup>3</sup> воды или отведение 1 м<sup>3</sup> стоков, на производство тонны цемента, на отопление 1 м<sup>2</sup> жилой площади и т.д. [5].

В настоящее время для перекачки воды в СВВ используют в основном центробежные насосы (ЦН). Широкое применение насосных агрегатов такого типа в НС систем подачи и распределения воды, перекачки стоков обуславливается простотой их конструкции, обеспечением больших подач, а также возможностью работы с загрязненными жидкостями, с различными свойствами и характеристиками. Главным недостатком ЦН является их относительно низкий КПД, составляющий в рабочем диапазоне для большинства конструкций не более 80...75%, что обусловлено принципом их работы. Другим существенным недостатком центробежных насосов является не жесткость напорной характеристики, приводящая при изменении подачи к существенному изменению напора и КПД.

Проблема повышения энергетической эффективности технологического процесса подачи необходимого количества воды под требуемым напором в соответствии с нуждами потребителей является одной из основных для систем водоснабжения и водоотведения [1, 3, 6 - 13]. Разработке новых конструкций и технологических процессов для повышения энергетической эффективности силовых агрегатов НС систем водоснабжения в технической литературе посвящено значительное количество исследований. В работах Лезнова Б.С., Николаева В.Г., Хованского С.А., Шмиголя В.В, Черносвитова М.Д., Бойко В.С., Сотника М.И., многих российских и зарубежных исследователей описаны подходы к повышению энергетической эффективности насосного оборудования НС систем водоснабжения путем регулирования режимов работы насосных агрегатов и согласования характеристик насосов и сетей водоснабжения с учетом условий их эксплуатации.

Определять приоритеты и очередность реализации целей и задач по повышению энергетической эффективности систем водоснабжения и водоотведения целесообразно выполнять на основе анализа, изучения и применения отечественного опыта, а также передовых зарубежных стран по вопросам энергетической эффективности. Политика европейских стран за последние десятилетия

является примером комплексного подхода к решению проблем повышения энергетической эффективности в различных сферах и отраслях экономики. В национальных системах учета повышения энергетической эффективности разных стран используются различные подходы ее количественного определения. Ключевым мероприятием является разработка единой системы показателей энергетической эффективности для различных уровней иерархии показателей и на ее основе принятие нормативных и законодательных документов, что обеспечивает создание системы стимулирования для внедрения энергосберегающих технологий. В последние десятилетия наиболее показательными стали мероприятия по маркировке энерго-эффективности оборудования и изделий. Суть маркировки состоит в том, что на основе исследования энергопотребления и анализа условий эксплуатации в группе однотипных изделий каждому из них рассчитывается и присваивается определенный индекс энергетической эффективности (ИЭЭ), который устанавливается в технической документации. В целях унификации шкала энергетической эффективности для всех групп маркируемых изделий разбивается на несколько классов.

Для разработки стандартных подходов оценки энергетической эффективности насосных агрегатов в РФ до настоящего времени были подготовлены ГОСТ EN16297-1-2015 «Общие требования и методика испытаний и расчета индекса энергетической эффективности (ИЭЭ)» [14] и ГОСТ EN16297-2-2015 «Расчет индекса энергетической эффективности (ИЭЭ) автономных циркуляционных насосов» [15]. В профессиональном сообществе, в основном производителей насосного оборудования, обсуждается вопрос применения так называемого «расширенного подхода» к оценке энергетической эффективности насосного оборудования [16, 17, 18]. Для этого планируется применять критерии эффективности для системы насос–двигатель–привод–сеть в целом. Опыт применения вышеуказанных стандартов для расчета ИЭЭ силовых агрегатов НС подкачки с учетом условий эксплуатации с анализом квалификационной схемы показателей был выполнен в работе [19]. Как показали выполненные расчеты ИЭЭ методика по определению ИЭЭ основана на результатах сложных и недостаточно обоснованных расчетов, которые мало пригодны для оперативной оценки энергетической эффективности силового агрегата в определенных условиях эксплуатации, а также при оценке стоимости жизненного цикла СВВ. Недостатком этого индекса является невозможность его простой логической интерпретации для анализа реальных условий работы силовых агрегатов СВВ.

Для силовых агрегатов НС оценку принятых технических решений и анализа их энергетической эффективности необходим объективный обобщенный критерий. В качестве такого критерия для силовых агрегатов НС можно принимать

удельный расход энергии в кВт · час на подачу 1 м<sup>3</sup> воды либо отведение 1 м<sup>3</sup> стоков.

Мощность, потребляемая силовым агрегатом НС в кВт определяется по зависимости

$$N = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q}{1000 \cdot \eta_a}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g = 9,82$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения;  $H$  – напор, создаваемый насосом, м;  $Q$  – подача насоса, м<sup>3</sup>/с;  $\eta_a$  – КПД силового агрегата, который определяется в виде произведения

$$\eta_a = \eta_n \cdot \eta_\varepsilon \cdot \eta_{\text{п}}, \quad (2)$$

где  $\eta_n$  – КПД насоса;  $\eta_\varepsilon$  – КПД электродвигателя;  $\eta_{\text{п}}$  – КПД элементов привода, установленных между насосом и электродвигателем либо изменяющих режимы работы силового агрегата.

Удельный расход энергии в кВт·час/м<sup>3</sup> на подачу воды, с учетом ее плотности  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup> находим по формуле

$$W = \frac{g \cdot H}{3600 \cdot \eta_a}, \quad (3)$$

Для каждой НС удельный расход энергии может существенно отличаться, в зависимости от характеристик силовых агрегатов, условий эксплуатации, систем регулирования. Средний удельный расход энергии на подачу воды в России составляет 0,5...0,55 кВт·час/м<sup>3</sup>, но для отдельных силовых агрегатов НС он может быть существенно ниже - 0,1...0,2 кВт·час/м<sup>3</sup> [8]. Удельный расход энергии пропорционален создаваемому напору насосным агрегатам, поэтому сравнение этих показателей объективно может отражать энергетическую эффективность систем водоснабжения с простым рельефом, на котором расположены потребители одной зоны по напору. Для оценки энергетической эффективности силовых агрегатов НС систем водоснабжения со сложным рельефом целесообразно применять удельный расход энергии в кВт·час/м<sup>3</sup> при создании напора равного 1 м, то есть

$$W_e = \frac{g}{3600 \cdot \eta_a} \quad (4)$$

Значение этого показателя зависит только от КПД силового агрегата и в диапазоне КПД  $\eta_a = 0,85 \dots 0,5$  составляет 3,4...5,5 Вт·час/м<sup>4</sup>. Для определения удельного расхода энергии на подачу воды необходимо применить соотношение

$$W = W_e \cdot H. \quad (5)$$

### АНАЛИЗ УДЕЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ РЕГУЛИРУЕМЫХ АГРЕГАТОВ

Совместная работа насосного агрегата и водопроводной сети (ВС) характеризуется рабочей

точкой, то есть параметрами при которых полезная мощность насоса равна мощности, потребляемой сетью, а напор насоса равен сопротивлению системы. Процесс регулирования параметров ВС осложняется существенными различиями их характеристик и напорных характеристик ЦН, то есть зависимостей напора от подачи. Аналитически эти характеристики представляются квадратичными функциями. При этом напорная характеристика ЦН на рабочем участке монотонно падающая, а ВС - монотонно растущая. Поэтому небольшие изменения подачи ВС могут приводить к значительным изменениям напора. Для обеспечения высокой энергетической эффективности насосного оборудования необходимо, чтобы при регулировании параметров КПД при регулировании не должен опускаться 10...15% от максимального уровня.

Одним из современных способов регулирования параметров силовых агрегатов насосных станций является частотное регулирование, которое обеспечивается изменением частоты вращения рабочего колеса ЦН. За счет регулирования частоты вращения рабочего колеса насосного агрегата, в некоторых случаях можно значительно сократить расходы на электроэнергию.

Изменение главных параметров насосных агрегатов с ЦН соответствует формулам пропорциональности, то есть

$$Q_{\text{и}} = Q_{\text{н}} \cdot i, \quad (6)$$

$$H_{\text{и}} = H_{\text{н}} \cdot i^2, \quad (7)$$

где  $Q_{\text{и}}, Q_{\text{н}}$  – измененная и начальная подача ЦН при номинальной частоте вращения,  $H_{\text{и}}, H_{\text{н}}$  – измененный и начальный напор ЦН при номинальной частоте вращения,  $i = \frac{n_{\text{и}}}{n_{\text{н}}}$  – степень изменения частоты вращения рабочего колеса ЦН,  $i_{\text{и}}, i_{\text{н}}$  – измененная и номинальная частота вращения рабочего колеса ЦН.

Изменение КПД при частотном регулировании подачи насосного агрегата с ЦН соответствует зависимости

$$\eta_{\text{и}} = 1 - \frac{(1 - \eta_{\text{н}})}{i^a}. \quad (8)$$

где  $\eta_{\text{и}}, \eta_{\text{н}}$  – измененный и начальный КПД насосного агрегата при номинальной частоте вращения,  $a = 0,2 \dots 0,3$  – параметр влияния.

В монографиях [8, 20] приводятся условия при которых применение частотного регулирования силовых агрегатов насосных обеспечивают технико-экономическую эффективность. Но приведенные условия носят в основном качественный характер. Для количественной оценки энергетической эффективности определим относительный удельный расход энергии на подачу воды при частотном регулировании насосного агрегата

$$\Delta W = \frac{W_{\text{и}}}{W_{\text{н}}}, \quad (9)$$

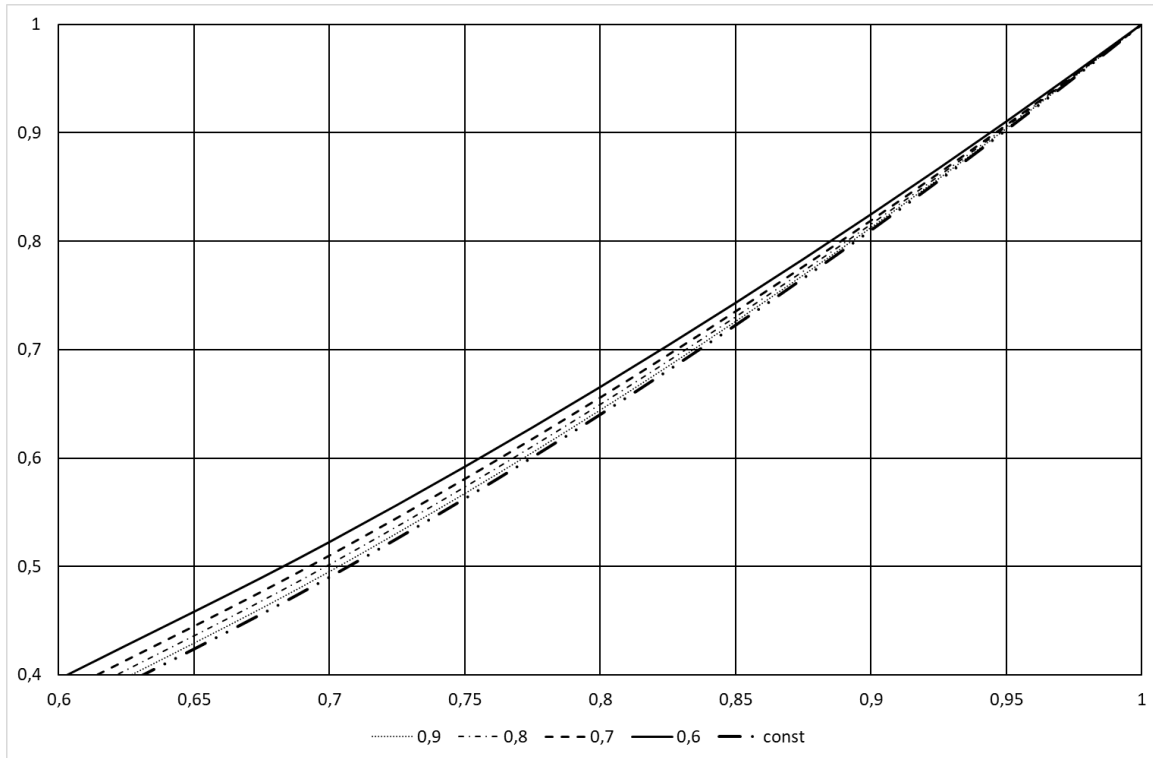
где  $W_{и}, W_{н}$  – измененный и начальный удельный расход энергии насосного агрегата при номинальной частоте вращения.

Относительный удельный расход энергии на подачу воды при частотном регулировании насосного агрегата с учетом зависимостей (3), (7) и (8) представим в виде

$$\Delta W = \frac{\eta_{н} \cdot i^{2+a}}{\eta_{н} + i^a - 1} \quad (10)$$

Результаты расчета относительного удельного расхода энергии на подачу воды при частотном регулировании насосного агрегата представлены на рис.1 для значений начального КПД насосного

агрегата при номинальной частоте вращения  $\eta_{н} = 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$  в диапазоне степени изменения частоты вращения рабочего колеса ЦН  $1 \leq i \leq 0,8$ , а также расчет этого показателя без учета влияния на КПД изменения частоты вращения рабочего колеса ЦН. Из анализа представленных на рис. 1 зависимостей следует, что с уменьшением степени изменения частоты вращения рабочего колеса ЦН и увеличении значений начального КПД насосного агрегата при номинальной частоте вращения  $\eta_{н}$  относительный удельный расход энергии на подачу воды при частотном регулировании уменьшается.



**Рис.1.** Зависимость относительного удельного расхода энергии на подачу воды при частотном регулировании насосного агрегата от степени изменения частоты вращения рабочего колеса ЦН

**Fig. 1.** Dependence of the relative specific energy consumption for water supply during frequency control of the pump unit on the degree of change in the speed of rotation of the CN impeller

При степени изменения частоты вращения рабочего колеса ЦН  $i = 0,9$ , в рассмотренном диапазоне значений КПД, относительный удельный расход энергии с учетом изменения КПД отличается менее чем на 2%, при  $i = 0,6$  различается, более чем на 11%.

Определение удельного расхода энергии на подачу воды при изменении частоты вращения рабочего колеса ЦН при известном удельном расходе энергии насосного агрегата при номинальной частоте вращения, согласно зависимости (9), определяется в виде

$$W_{и} = \Delta W \cdot W_{н} \quad (11)$$

Анализ результатов применения в системах водоснабжения и водоотведения регулируемого электропривода ЦН показал, что в одних случаях его установка приводит к ощутимой экономии

энергии, в других – она незначительна, в-третьих, установка такого привода не обеспечивает получение экономии энергии [8, 20, 21]. Это показало необходимость разработки методики оценки энергетической эффективности применения частотного регулирования ЦН на ранних стадиях проектирования СВ.

Предложена методика оценки энергетической эффективности силовых агрегатов НС СВВ по удельным показателям, в том числе с применением частотного регулирования ЦН. В качестве объекта исследований приняты удельный расход энергии либо относительный удельный расход энергии на подачу воды при частотном регулировании насосного агрегата.

Оценка энергетической эффективности силовых агрегатов НС по удельным показателям, с достаточной для инженерных расчетов точностью, отображает энергетические характеристики

реальных ЦН. Поэтому может служить основой для расчета стоимости жизненного цикла при сравнительном анализе систем подачи и распределения воды с различными силовыми агрегатами и системами регулирования.

## ВЫВОДЫ

К наиболее энергоемким объектам жилищно-коммунального хозяйства относятся СВВ, в которых основными потребителями энергии являются силовые агрегаты НС. Поэтому важным направлением совершенствования этих систем жизнеобеспечения, является повышение энергетической эффективности, что является приоритетным направлением исследований в соответствии с законодательством Российской Федерации.

В качестве критерия оценки энергетической эффективности предложено рассматривать удельный расход энергии либо относительный удельный расход энергии на подачу воды при частотном регулировании насосного агрегата. Представлены расчетные зависимости для определения относительного удельного расхода энергии на подачу воды при частотном регулировании насосного агрегата от степени изменения частоты вращения рабочего колеса ЦН.

Оценка энергетической эффективности силовых агрегатов НС по удельным показателям, с достаточной для инженерных расчетов точностью, позволяет выполнять расчеты стоимости жизненного цикла при сравнительном анализе систем подачи и распределения воды с различными силовыми агрегатами и системами регулирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Николаев В. Г. Энергосберегающие способы выбора параметров и оптимизация управления группой лопастных нагнетателей в нестационарных технологических процессах: дис. ... докт. техн. наук. – Щелково, 2008. – 372 с.
2. Хроменков С.В. Задачи развития водной отрасли для обеспечения населения России чистой водой// Водоснабжение и санитарная техника. – 2011. № 5. – С. 15 – 22.
3. Хованський С.О. Підвищення ефективності експлуатації відцентрових насосів у системі водопостачання житлово-комунального господарства: дис. ... канд. Техн. Наук. –Суми, 2010. – 162 с.
4. Федеральный закон от 23.11.2009 г. № 261 – ФЗ (с ред. от 13.07.2015 г.) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
5. Башмаков И.А., Мышак А.Д. Российская система учета повышения энергоэффективности и экономии энергии// М.: ЦЭНЭФ, 2012. – 81 с.
6. Кирсанов А.А. Исследование работы внутриквартальных подкачивающих насосных станций/ А.А. Кирсанов, В.Н. Колчев, В.В. Шмиголь, М.Д. Черносвитов// Водоснабжение и санитарная техника. – 2011. - № 9, ч.2. – С. 30-33.
7. Черносвитов М.Д. Энергетическая эффективность интегрального регулирования работы повысительных насосов// Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. – 2013. - № 4 (13). – С. 96 – 99.
8. Лезнов Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. – М.: Машиностроение, 2013. – 176 с.
9. Николенко И., Пастушенко А., Котовская Е. Анализ влияния условий эксплуатации насосной станции на параметры насосных агрегатов// MOTROL: Polish Academy of sciences. – Lublin, 2010. – Vol. 12D. – p. 33-44.
10. Бойко В.С. Аналіз частотного регулювання відцентрових насосів водопостачання з метою енергозбереження/ В. С. Бойко, В. Г. Неня, М. І. Сотник, С. О. Хованський// Вісник КДПУ ім. М. Остроградського.– Кременчук: КДПУ. - Вип. 4, 2009 (57), ч. 1. – С. 147-151.
11. Николенко И.В., Рыжаков А.Н., Умаров Р.С. Повышение энергетической эффективности регулирования силовых агрегатов насосных станций систем водоснабжения// Строительство и техногенная безопасность. Сб. научных трудов АСиА. – Симферополь, 2016. – вып. 55. – С. 75 – 82.
12. Фисенко В.Н. Энергетическая эффективность насосов в системах водоснабжения и водоотведения// Водоснабжение и санитарная техника. -2018, №6. - С. 52 - 56.
13. Шмиголь В.В., Черносвитов М.Д., Атанов Н.А. Интегральное регулирование работы повысительных насосов// Водоснабжение и санитарная техника. - 2013, № 8. – С. 23 – 27.
14. ГОСТ EN16297-1-2015. Энергетическая эффективность. Насосы циркуляционные герметичные. Общие требования и методики испытаний и расчета индекса энергетической эффективности (ИЭЭ).
15. ГОСТ EN16297-2-2015. Энергетическая эффективность. Насосы циркуляционные герметичные. Расчет индекса энергетической эффективности (ИЭЭ) автономных циркуляционных насосов.
16. ISO/ASME 14414:2015 (E) Pumping system energy assessment, MOD.
17. ISO/ASME 14414:2015, MOD. Оценка энергоэффективности насосных систем. Проект межгосударственного стандарта.
18. Draft EUROPEAN STANDARD EN 16480 Pumps-Minimum required efficiency of rotor dynamic water pumps. – p. 68.
19. Николенко И.В., Котовская Е.Е. Оценка энергетической эффективности работы агрегатов насосных станций подкачки с учетом условий эксплуатации// Строительство и техногенная безопасность. – 2016, № 4 (56). – С. 103-112.
20. Березин С.Е. Насосные станции с погружными насосами. Расчет и конструирование. – М.: Стройиздат, 2008. – 160 с.

21. Николенко И.В. Анализ энергоэффективности частотного регулирования по относительным параметрам силовых агрегатов насосных станций и водопроводных сетей систем водоснабжения// Строительство и техногенная безопасность. – 2019, № 14 (66). - С. 101-111.

## ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY OF POWER UNITS PUMPING STATIONS WATER SUPPLY AND SANITATION SYSTEMS BY SPECIFIC INDICATORS

Nikolenko I.V.

**Annotation.** The analysis of problems of increasing the energy efficiency of power units of pumping stations of water supply systems is performed. The analysis of the concept of energy efficiency in application to power units of pumping stations of water supply and sanitation systems is carried out. A technique and analytical dependencies for evaluating the energy efficiency of power units based on specific indicators, including their frequency regulation, are proposed. This method significantly simplifies the process of evaluating energy efficiency at the design stage of pumping stations for water supply systems.

**Key words:** energy efficiency, water supply system, water supply network, pumping unit, specific energy consumption, frequency regulation.