

УДК 621.514

doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181294

© Лухтура Ф.И.¹, Медведева М.В.², Кукин И.А.³, Сидоренко Н.С.⁴**ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧИ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ В СИСТЕМАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

Рассмотрены практические приложения полученных ранее теоретических результатов по применению импульсного (циклического) подключения насосов, работающих на сеть, для покрытия существенно переменных нагрузок насосной станции. Проведен анализ эффективности работы насосных станций с различными блоками насосных установок и параметрами систем водоснабжения при переменных нагрузках на основе анализа разработанной математической динамической модели системы производства и распределения рабочей среды (воды). Теоретические результаты послужили основой для разработки алгоритмов оптимизации системы регулирования ступенчатой подачи нагнетателя путем его перевода на холостой ход, в т. ч. глубоким дросселированием, или с полным отключением приводного двигателя, для анализа работы насосной станции на переменных режимах при покрытии неравномерных графиков ее нагрузок с оценкой затрат потребляемой энергии. Показано существенное влияние различных факторов и функциональных параметров на характеристики импульсного подключения нагнетателей и интенсивность подачи энергоносителя при переменных нагрузках. Характерно, что при сравнении различных режимов импульсной подачи (с холостым ходом и без) более предпочтительным режимом является режим с полным отключением насосов от сети. При этом эффективность растет с ростом числа эксплуатируемых агрегатов и достигает 15% по сравнению с традиционным способом подачи рабочей среды для покрытия переменных нагрузок станции.

Ключевые слова: графики нагрузок, насосная станция, насос, рабочая среда, энергия, аккумулятор, импульсное (циклическое, ступенчатое) регулирование, эффективность.

Лухтура Ф.И., Медведева М.В., Кукин И.А., Сидоренко Н.С. Про ефективність використання імпульсної подачі робочого середовища в системах водопостачання. Розглянуто практичне використання отриманих раніше теоретичних результатів із застосуванням імпульсного (циклічного) підключення насосів, що працюють на мережу, для покриття суттєво змінних навантажень насосної станції. Проведено аналіз ефективності роботи насосних станцій з різними блоками насосних установок і параметрами систем водопостачання при змінних навантаженнях на основі аналізу розробленої математичної динамічної моделі системи виробництва і розподілу робочого середовища (води). Отримана інженерна теорія послужила також основою для розробки алгоритмів оптимізації системи регулювання подачі нагнітача шляхом його переведення на холостий хід, в т. ч. глибоким дроселюванням, при ступінчастому регулюванні або з повним відключенням приводного двигуна, для аналізу роботи насосної станції на змінних режимах при покритті нерівномірних графіків її навантажень з оцінкою витрат споживаної енергії, з метою визначення та підвищення економічної ефективності від використання різного складу насосного обладнання в запропонованих режимах. Визначено, в залежності від ємності мережі та акумулюючих пристроїв і величини споживання рідини раціональні компоновки насосного обладнання, ефе-

¹ ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, lukhelen@yandex.ru

² ассистент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

³ студент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

⁴ студент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

ктивні значення тривалості імпульсів подачі робочого середовища агрегатами насосної станції та паузи між імпульсами, а також скванності імпульсів, при використанні різних блоків насосного обладнання. При цьому важливою характеристикою надійності системи «електропривід-насос» є частота циклів, що лімітують кількість регламентованих включень електродвигунів відповідної потужності. Показано суттєвий вплив перерахованих факторів і зазначених функціональних параметрів на характеристики імпульсного підключення нагнітачів і інтенсивність подачі енергоносія при змінних навантаженнях. Характерно, що при порівнянні різних режимів імпульсної подачі (з холостим ходом і без) кращим режимом є режим з повним відключенням насосів від мережі. При цьому ефективність зростає з ростом числа експлуатованих агрегатів і досягає 15% в порівнянні з традиційним способом подачі робочого середовища для покриття змінних навантажень станції. Отримані результати також можуть бути корисні для вирішення оптимізаційних завдань при роботі насосної станції на змінних режимах при покритті її річних графіків навантажень. Даний підхід і представлені рішення можуть бути поширені на інші класи нагнітальних станцій з компресорами або вентиляторами, що використовують газ як робоче середовище для покриття нерівномірних навантажень нагнітальних станцій.

Ключові слова: графіки навантажень, насосна станція, насос, робоче середовище, енергія, акумулятор, імпульсне (циклічне, поетапне) регулювання, ефективність.

F.I. Lukhtura, M.V. Medvedieva, I.A. Kukin, N.S. Sidorenko. On the efficiency of pulse supply of the working environment in water supply systems. Practical applications of previously obtained theoretical results on the use of pulsed (cyclic) connection of pumps operating on a network to cover substantially variable loads of a pumping station are considered. The analysis of the efficiency of pumping stations with various units of pumping units and the parameters of water supply systems at variable loads based on the analysis of the developed mathematical dynamic model of the production and distribution of the working medium (water) has been carried out. The resulting engineering theory also served as the basis for the development of algorithms for optimizing the supercharger feed control system by transferring it to idle, including by deep throttling, with step regulation or with the drive motor completely turned off, to analyze the operation of the pumping station in variable modes while covering uneven load schedules with an estimate of the energy consumption, in order to determine and increase the economic efficiency of using different pump equipment in the proposed modes. Rational layout of the pumping equipment, effective values of the duration of the pulses of the working medium supply by the units of the pumping station and the pause between pulses, as well as the duty cycle of the pulses using various blocks of pumping equipment have been determined depending on the capacity of the network, accumulating devices and the liquid consumption. An important characteristic of the reliability of the «electric drive-pump» system is the frequency of cycles that limit the number of regulated starts of electric motors of the corresponding power. The significant influence of the listed factors and the specified functional parameters on the characteristics of the pulse connection of the superchargers and the intensity of the energy supply at variable loads is shown. It is characteristic of the process that when comparing different pulse supply modes (with and without idle), the more preferable mode is the mode with the pumps completely disconnected from the network. As this takes place, the efficiency increases with the increase in the number of operating units and reaches 15% in comparison with the traditional way of supplying a working medium to cover the variable loads of the station. The results obtained can also be useful for solving optimization problems during the operation of a pumping station in variable modes when covering its annual load schedules. This approach and the solutions presented can be extended to other classes of injection stations with compressors or fans that use gas as a working medium to cover uneven loads of the injection stations.

Keywords: load schedules, pump station, pump, working medium, energy, battery, pulse (cyclic, step) regulation, efficiency.

Постановка проблеми. Актуальность рассматриваемых в статье вопросов определяется возросшим значением энергоэффективности и оптимизации системы подачи и распределения (СПР) рабочей среды (сжатого газа и жидкости), требующие развития действующих и создания новых высокоэффективных систем для промышленных предприятий и коммунального хозяйства, которым в современных условиях отечественные хозяйствующие субъекты и общество в целом отводят первостепенную роль. В связи с ростом цен на электроэнергию и, как следствие, увеличением издержек насосных станций (НС), связанных с оплатой электроэнергии, вопрос эффективного и рационального использования энергетических ресурсов на НС становится сверхактуальным. К тому же, повышение энергоэффективности НС является перспективным направлением снижения энергопотребления. Для снижения энергоемкости большое значение придается оптимизации системы подачи и распределения рабочей среды и НС в целом, т. к. насосные станции, как один из основных структурных элементов СПР, во многом определяют ее эксплуатационные и экономические показатели работы.

Анализ последних исследований и публикаций. В [1-18] представлены решения многообразных оптимизационных задач, связанных как с насосными, так и другими нагнетательными станциями для транспорта различных рабочих сред. Вследствие изменения объемов производства по мере суточного потребления агрегаты насосной станции часто эксплуатируются в неоптимальных режимах с пониженным КПД, что может приводить к существенному перерасходу электроэнергии. Решение задачи снижения энергозатрат на НС с предварительным построением математической модели системы СПР методами математического программирования представлены в [5-9].

Проведенный анализ существующей практики совершенствования СПР-системы позволил выявить ее некоторые недостатки:

1) в существующих инженерных инструментариях все элементы системы СПР рассматриваются по отдельности, без учета взаимного влияния НС и потребителей, обусловленного наличием технологических связей;

2) недостаточная информированность математических моделей относительно каждого агрегата и оптимального соотношения их комплектов в случае регулирования переменной нагрузки, в т. ч. пиковой, и влияния на энергетическую характеристику всей НС.

Кроме того, по существующим оценкам, до 50% энергозатрат НС-систем может быть снижено за счет изменения состава оборудования НС и способов управления ими. Одним из эффективных путей экономии энергоресурсов при существующих переменных нагрузках является оптимизация состава и режимов работы оборудования. Она может производиться по следующим направлениям: выбор оптимального числа эксплуатируемых агрегатов; оптимального распределения нагрузки между ними; оптимизация работы установок с использованием циклического (ступенчатого) их подключения при работе на сеть [1-4, 17] и др.; рациональное построение СПР рабочей среды для покрытия переменных нагрузок НС.

Совокупность указанных факторов является основанием для постановки задачи оптимизации параметров НС в условиях неопределенности и неравномерности фактических расходов. Поэтому представляется актуальным совершенствование методологий, разработка моделей и комплексов, позволяющих оптимизировать параметры и состав оборудования НС. Определение в пределах НС оптимального числа и типа агрегатов с учетом расчетной подачи обеспечит анализ вариантов различных технологических схем для покрытия переменной нагрузки НС. Полученные результаты могут быть интегрированы в общую задачу определения оптимальной работы НС и СПР в целом.

СПР (с комплексом энергетического оборудования) производит столько продукции [18], сколько требуют в данный момент потребители, определяющие нагрузку НС, – количество энергоресурса, вырабатываемое станцией в данный момент. Этим определяются и характер работы насосных станций (НС) и др., и их графики нагрузок – изменение вырабатываемой нагрузки во времени. Обычно изменение вырабатываемой продукции или потребляемой электрической нагрузки во времени представляется графически. В зависимости от отрезка времени различают суточные, недельные, сезонные (лето, зима и т. д.) и годовые графики. Они служат для выбора состава оборудования при проектировании станций, определения текущих и годовых технико-экономических показателей, распределения нагрузок и установления оптимальных режимов работы оборудования. Особенно большое значение для выбора режимов работы и

эксплуатации оборудования станций имеют суточные графики нагрузок [18] (рис. 1). Последние (графики потребления электроэнергии) отличаются значительной неравномерностью, что объясняется неодинаковым режимом потребления рабочей среды (продукции НС) разными группами потребителей: коммунальными хозяйствами, промышленными потребителями и др. Нагрузка Q непрерывно изменяется, достигая в определенные моменты наибольшей (Q_{max}) и наименьшей (Q_{min}) величин. На этом основании график нагрузок разбивают на три зоны: пиковая, полупиковая и базовая.

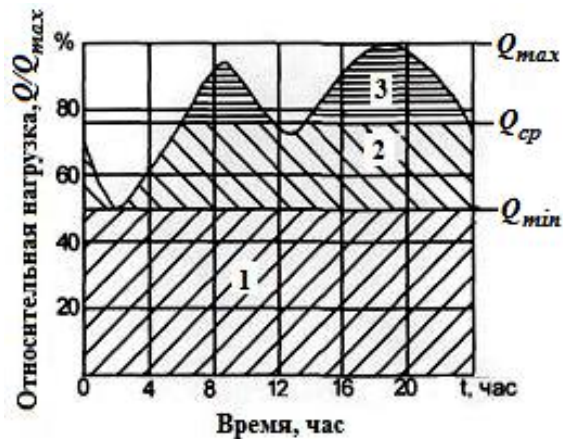


Рис. 1 – Суточный график производства продукции (сжатого газа или жидкости) и/или потребления электроэнергии нагнетательной станцией: 1 – базовая нагрузка; 2 – полупиковая нагрузка; 3 – пиковая нагрузка

График является обычно двугорбым, т. е. имеет два пика – утренний (примерно в 6-8 часов) и вечерний (в 16-20 часов) максимумы нагрузок из-за резкого увеличения потребления. Ночной провал нагрузок связан с резким снижением потребления населения, может сохраняться только нагрузка предприятий с непрерывным циклом, подключенных к системе СПР. Провал потребления нагрузки наблюдается в 12-14 часов, в основном, в связи со снижением коммунально-бытовой нагрузки. В эти периоды времени нагрузка на НС снижается настолько, что агрегаты могут быть выведены из работы или в глубокое дросселирование. В зависимости от времени года, от дней недели, от снабжения потребителей различными видами продукции, от метеорологических факторов, состояния магистральных сетей и др. суточные графики нагрузки видоизменяются. Вследствие изменения объемов производства по мере суточного потребления, агрегаты нагнетательной станции (НС) часто эксплуатируются в неоптимальных режимах с пониженным КПД, что может приводить к существенному перерасходу электроэнергии. Максимум КПД, как правило, наблюдается менее 50% времени. Поэтому вопросы регулирования насосной станции и ее экономичность имеют большое значение. Способы регулирования (применяемые для всех типов машин) различные [17-18]. Не перечисляя известные методы, обратим внимание на способ периодического отключения или перевода нагнетателя в режим холостого хода, на так называемое циклическое (импульсное) регулирование [17]. Последний способ предложен в [1-2] для ступенчатого регулирования винтовых компрессоров и широко распространен. В этом случае нагнетатели обычно оснащаются системой регулирования, обеспечивающей изменение производительности путем автоматического перевода нагнетателя на холостой ход [1-4]. Незначительным недостатком предложенного способа является полученное предлагаемой инженерной теорией линейное изменение давления в системе во времени прохождения фаз холостого хода и нагнетания, что противоречит физическим основам этих процессов в предлагаемых условиях.

Для насосных установок с циклическим регулированием подачи жидкости при периодическом отключении насосов такая теория разработана в [17], где проведен глубокий анализ динамики такого импульсного регулирования.

Цель работы – на основе ранее разработанной физической модели рабочего процесса [17] и ее анализе для установок НС с циклическим (импульсным) подводом рабочей среды к системе водоснабжения представить практическое обоснование эффективности такой подачи рабочей среды при переменных суточных графиках нагрузок. Попытаться разработать оптимальные варианты при выборе состава насосного оборудования НС для покрытия как базовой части суточного переменного графика ее нагрузок, так и пиковой, для рационального построения системы производства и транспорта рабочей среды и улучшение работы НС, в т. ч. для перспективных проектов.

Изложение основного материала. В настоящее время основным требованием, предъявляемым к насосным станциям, является обеспечение высокого уровня энергоэффективности и надежности в условиях глубоко переменных режимов работы НС. В связи с этим возникает необходимость одновременно с изменением характеристики сети изменять и параметры НС. Последнее достигается ее управлением. Задачей управления НС является обеспечение режимов НС, необходимых по условиям эксплуатации, максимально рациональным путем в зависимости от принимаемых критериев.

Расход рабочей среды, согласно графику нагрузки станции, в каждый заданный момент времени определяется системой потребления, и его можно считать условно объективным, он не поддается корректировке без ущерба для потребителей. Значит, согласования вырабатываемого количества рабочей среды и его расходы потребителю следует осуществлять за счет изменения рабочих параметров НС, т. е. настройки системы СПР за счет влияния на насосы НС. Одним из способов регулирования подачи насосов НС является перевод насосов на циклический режим эксплуатации. Циклическую подачу можно осуществлять разными методами регулирования: переводом на холостой ход или остановом насоса, частотным регулированием подачи, дросселированием и др. При этом необходима адаптация того или иного метода регулирования под предлагаемую методику циклической подачи. Также необходимо наличие достаточно емких аккумуляторов.

В соответствии с представленной в [17] теорией импульсной подачи рабочей среды на насосных станциях была разработана методика расчета, которая по определенному алгоритму определяет регулировочные характеристики насосной станции для покрытия суточного графика нагрузок в различных возможных ее вариантах работы. Эта методика позволяет определить для каждого режима потребления продолжительность цикла, фаз нагнетания и холостого хода (или останова), величину скважности и др. при полном отключении насосов во время паузы. При этом в [17] рассматривали СПР (рис. 2) с призматическим баком-аккумулятором объемом V , площадью поперечного сечения F и начальным напором $H_{нач}$, (или начальным давлением $p_{нач}$), создаваемым напором H (избыточным давлением нагнетания p), с полученным нелинейным его изменением во времени прохождения соответствующих фаз с суммарной площадью сечения потребления f . Общую систему нагнетания заменяли эквивалентным объемом аккумулятора, давление окружающей среды и коэффициенты расхода системы трубопроводов сети принимали постоянными.

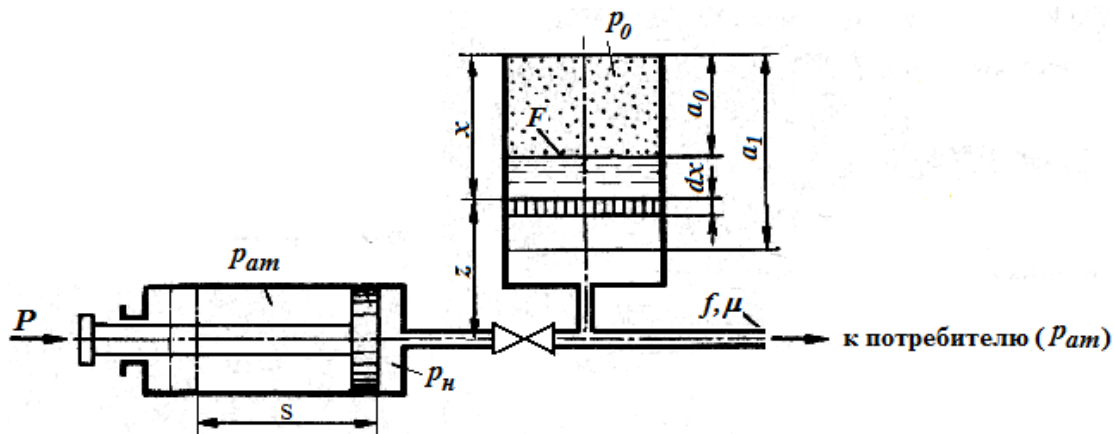


Рис. 2 – Формализованная принципиальная схема СПР рабочей среды

Так продолжительность цикла при полном отключении насосов станции составила

$$\begin{aligned} \tau_{ц} = \tau_{нагн} + \tau_{паузы} &\cong \frac{2F \sqrt{H_{уст}}}{\mu \cdot f \sqrt{2g}} \frac{\sqrt{H_{нач}^{паузы}} - \sqrt{H_{нач}^{нагн}}}{\sqrt{H_{уст}} - \sqrt{H_{нач}^{паузы}}} = \\ &= \frac{2V_{нач}^{нагн}}{Q_{н}} \cdot \frac{\sqrt{\frac{H_{нач}^{паузы}}{H_{нач}^{нагн}}} - 1}{1 - q_{V \text{ нач..нагн.}}} + \frac{2V_{нач}^{паузы}}{Q_{н}} \frac{1 - \sqrt{\frac{H_{нач}^{нагн}}{H_{нач}^{паузы}}}}{q_{V \text{ нач..паузы.}}} \approx \frac{2V_{нач}}{Q_{н}} \left(\frac{\sqrt{\frac{H_{нач}^{паузы}}{H_{нач}^{нагн}}} - 1}{1 - q_{V \text{ нач..нагн.}}} + \frac{1 - \sqrt{\frac{H_{нач}^{нагн}}{H_{нач}^{паузы}}}}{q_{V \text{ нач..паузы.}}} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Время нагнетания

$$\tau_{нагн} = \frac{2F \cdot H_{нач}^{нагн}}{Q_{нач.потр}} \cdot \frac{\sqrt{H_{нач}^{паузы}} - \sqrt{H_{нач}^{нагн}}}{\sqrt{H_{уст}} - \sqrt{H_{нач}^{нагн}}} = \frac{2V_{нач}^{нагн}}{Q_{н}} \cdot \frac{\sqrt{\frac{H_{нач}^{паузы}}{H_{нач}^{нагн}}} - 1}{1 - q_{V \text{ нач..нагн.}}} \quad (2)$$

Время отключения подачи

$$\begin{aligned} \tau_{паузы} &= \frac{2F}{\mu \cdot f \sqrt{2g}} \left[\sqrt{H_{нач}^{паузы}} - \sqrt{H_{нач}^{нагн}} \right] = \frac{2FH_{нач}^{паузы}}{Q_{нач.потр}} \left[1 - \sqrt{\frac{H_{нач}^{нагн}}{H_{нач}^{паузы}}} \right] = \\ &= \frac{2V_{нач}^{паузы}}{Q_{нач.потр}} \left[1 - \sqrt{\frac{H_{нач}^{нагн}}{H_{нач}^{паузы}}} \right] = \frac{2V_{нач}^{паузы}}{Q_{нач.потр}} \left[1 - \frac{q_{V \text{ нач..нагн.}}}{q_{V \text{ нач..паузы.}}} \right] = \frac{2V_{нач}^{паузы}}{Q_{н}} \frac{\left[1 - \sqrt{\frac{H_{нач}^{нагн}}{H_{нач}^{паузы}}} \right]}{q_{V \text{ нач..паузы.}}} \end{aligned} \quad (3)$$

Сквозность процесса

$$\begin{aligned} S = \frac{\tau_{ц}}{\tau_{нагн}} &= \frac{\sqrt{H_{уст}}}{\sqrt{H_{нач}^{нагн}}} \frac{\sqrt{H_{уст}} - \sqrt{H_{нач}^{нагн}}}{\sqrt{H_{уст}} - \sqrt{H_{нач}^{паузы}}} = \frac{\sqrt{\frac{H_{уст}}{H_{нач}^{нагн}}} - 1}{1 - \sqrt{\frac{H_{нач}^{паузы}}{H_{уст}}}} = \\ &= \frac{\frac{Q_{нас}}{\mu \cdot f \sqrt{2gH_{нач}^{нагн}}} - 1}{1 - \frac{Q_{нас}}{\mu \cdot f \sqrt{2gH_{нач}^{паузы}}}} = \frac{\frac{Q_{нас}}{Q_{нач.потр}} - 1}{1 - \frac{Q_{нас}^{паузы}}{Q_{нач.потр}}} = \frac{1}{1 - q_{V \text{ нач..нагн.}}} - 1 = \frac{1}{q_{V \text{ нач..нагн.}}} \frac{1 - q_{V \text{ нач..нагн.}}}{1 - q_{V \text{ нач..паузы.}}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $H_{уст}^{\frac{1}{2}} = \frac{Q_{нас}}{\mu \cdot f \sqrt{2g}}$;

а частота циклов:

$$\omega = \frac{1}{\tau_{ц}} \cong \frac{\mu \cdot f \sqrt{2g}}{2F \sqrt{H_{нач}^{паузы}}} \frac{1 - \sqrt{\frac{H_{нач}^{паузы}}{H_{уст}}}}{1 - \sqrt{\frac{H_{нач}^{нагн}}{H_{нач}^{паузы}}}} = \frac{Q_{нач.потр}^{паузы}}{2FH_{нач}^{паузы}} \frac{1 - \frac{Q_{нач.потр}^{паузы}}{Q_{нас}}}{1 - \frac{Q_{нач.потр}^{нагн}}{Q_{нач.потр}^{паузы}}}, \quad (5)$$

где $Q_{нач.паузы}$ – величина потребления (расход) в начале паузы; $Q_{нач.нагн}$ – величина потребления в начале нагнетания; $V_{нач}^{нагн}$ и $V_{нач}^{паузы}$ – объем жидкости в аккумуляторе в начале и конце процесса нагнетания; $\tau_{нагн}$, $\tau_{паузы}$ – длительность процессов подачи и паузы, $\frac{H_{нач}^{паузы}}{H_{нач}^{нагн}} = \frac{H_{max}}{H_{min}}$ – отношение максимальной и минимальной степени повышения напора (давления); $q_V = \frac{Q_{потр}}{Q_{нас}}$ – относительный параметр потребления рабочей среды; V – емкость сети, м; $Q_{нас}$ – номинальная произ-

водительность насосов, м³/мин.

Мощность (количество энергии в единицу времени), потребляемая за цикл $\tau_{ц} = \tau_{нагн} + \tau_{паузы}$ при условии полного отключения насосов

$$P_{ц} = \frac{P_{max}}{S} = P_{max} \cdot \left[q_{V \text{ нач..нагн.}} \cdot \frac{1 - q_{V \text{ нач..паузы.}}}{1 - q_{V \text{ нач..нагн.}}} \right]. \quad (6)$$

При переводе насосов на холостой ход на основе анализа вышеприведенных соотношений можно записать

$$P_{ц} = P_{max} \left[\frac{1}{S} + k \frac{(S-1)}{S} \right] = P_{max} \cdot \left[q_{V \text{ нач..нагн.}} \cdot \frac{1 - q_{V \text{ нач..паузы.}}}{1 - q_{V \text{ нач..нагн.}}} + \kappa \left(1 - q_{V \text{ нач..нагн.}} \cdot \frac{1 - q_{V \text{ нач..паузы.}}}{1 - q_{V \text{ нач..нагн.}}} \right) \right]. \quad (7)$$

Мощность, потребляемая насосами за цикл паузы на холостом ходу, принята равной $P_{х.х} = k \cdot P_{max}$, где k – коэффициент холостого хода.

При соблюдении указанных в [17] условий импульсный режим подвода энергии к рабочей среде, как независимый фактор влияния, должен быть более экономичным, чем традиционный (безимпульсный) режим регулирования подачи.

Для доказательства эффективности практического применения режима импульсной подачи рабочей среды при покрытии переменного графика нагрузок в качестве конкретного примера рассмотрена НС, оборудование которой включает десять насосов производительностью $Q_{нас} = 10 \text{ м}^3/\text{мин}$ номинальной мощностью $N_n = 62 \text{ кВт}$, системой холостого хода при $k = 0,5$ (и

отключения насосов – $k = 0$) с диапазоном настройки $\frac{H_{max}}{H_{min}} = 1,1$ каждый при максимальной

емкости аккумулятора и сети $V = 200 \text{ м}^3$. Суточный (формализованный) график нагрузки насосной станции и производительность каждого ее насоса приведен на рис. 3. Для упрощения расчета суточный график нагрузки и производительности НС (рис. 1) сведен к линейно-ступенчатому, где число суточных часов разделено на 6 равных интервалов. Величина нагрузки (сплошная полужирная линия) на каждом интервале указаны в поле рисунка в м³/мин. Здесь же поинтервально нанесена по вертикали равномерная разбивка (светлые линии), указывающая единичную производительность насосов станции $Q_{нас}$.

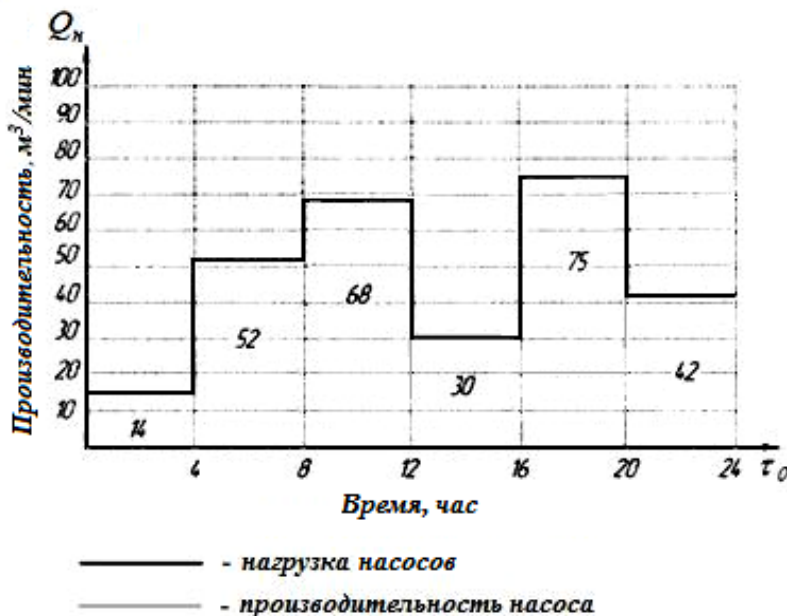


Рис. 3 – Суточный график нагрузки и производительности НС

При изменении потребления рабочей среды напор в сети изменяется: увеличение потребления вызывает уменьшение напора, а уменьшение потребления, наоборот, повышение напора

в соответствии с рабочими характеристиками насосов. Согласно схеме регулирования датчик давления (напора) превращает импульс в аналоговый или цифровой сигнал, который инициирует работу системы управления НС по алгоритму. При этом предварительно производится настройка датчика на срабатывание при повышении (сигнал «+») и снижении давления (сигнал «-») по сравнению с принятыми величинами H_{\max} и H_{\min} . После выбора определенного варианта система дает управляющий сигнал на включение (или перевода на холостой ход) соответствующих насосов. Система стабилизируется до получения следующего сигнала от датчика давления (или расхода).

При решении этой задачи были приняты следующие основные допущения:

- 1) КПД насоса при изменении потребления не изменяется и им пренебрегаем. Мощность потребления уменьшается при уменьшении подачи;
- 2) гидросистема задемпфирована, случайные пульсации давления в системе «гасятся» и датчик давления (напора) не реагирует на них;
- 3) при обработке сигнала датчика используются современные системы с процессорами – системы автоматической обработки сигнала с прогнозированием продолжительности измененного режима нагрузки;
- 4) на трудоспособность системы не оказывает влияния время срабатывания системы, складывающееся из времени обработки сигнала, времени алгоритмического анализа и времени пуска (или остановки).

При этом насосы должны быть оснащены системой регулирования, обеспечивающей изменение производительности насоса по возможности от 0 до 100% путем автоматического перевода его на холостой ход, в т. ч. глубоким дросселированием, или выведены из работы, используя ступенчатое (цикличное) регулирование.

В табл. 1-3 представлены на основании соотношений (1)-(7) расчеты регулировочных характеристик насосной станции при работе, соответственно, 10-ти насосов, 8 (2 в резерве) и от 2 до 8 насосов. Работа последних осуществлялась в соответствии со своим графиком суточной нагрузки НС (табл. 3, рис. 3), количество работающих насосов при покрытии соответствующей нагрузки изменялось.

Таблица 1

Регулировочные характеристики НС при работе 10 насосов

Расчетный параметр	Обозначение	Интервал времени суток, час					
		0-4	4-8	8-12	12-16	16-20	20-24
Число работающих насосов	z	10	10	10	10	10	10
Расход потребителя	$Q_n, \text{ м}^3/\text{мин}$	14	52	68	30	75	42
Относительный параметр потребления	q_v	0,14	0,52	0,68	0,3	0,75	0,42
Время импульса	$\tau_n, \text{ с}$	12,4	22,2	33,3	15,2	42,6	18,4
Время паузы	$\tau_{\text{паузы}}, \text{ с}$	87,8	23,6	18,1	41,0	16,4	29,3
Продолжительность цикла	$\tau_{\text{ц}}, \text{ с}$	100,1	45,8	51,3	56,2	59,0	47,6
Скважность	S	8,09	2,06	1,54	3,69	1,38	2,59
Частота циклов	$\omega, \text{ 1/час}$	36	79	70	64	61	76
Потребляемая мощность за цикл (без ХХ)	$P_{\text{ц}}, \text{ кВт}$	76,7	300,3	401,8	167,9	447,8	239,1
Потребляемая мощность за цикл – период нагнетания и ХХ	$P_{\text{ц}}, \text{ кВт}$	348,3	460,1	510,9	394,0	533,9	429,5
Рассматриваемый промежуток времени	$\Delta t, \text{ час}$	4	4	4	4	4	4
Потребляемая мощность за этот период, без ХХ	$W_i, \text{ кВт}\cdot\text{час}$	307	1201	1607	672	1791	956
Потребляемая мощность за этот период, с ХХ	$W_i, \text{ кВт}\cdot\text{час}$	1393	1841	2044	1576	2136	1718

Таблица 2

Регулировочные характеристики НС при работе 8 насосов

Расчетный параметр	Обозначение	Интервал времени суток, час					
		0-4	4-8	8-12	12-16	16-20	20-24
Число работающих насосов	z	8	8	8	8	8	8
Расход потребителя	$Q_n, \text{ м}^3/\text{мин}$	14	52	68	30	75	42
Относительный параметр потребления	q_v	0,175	0,65	0,85	0,375	0,9375	0,525
Время импульса	$\tau_n, \text{ с}$	16,1	38,0	88,7	21,3	213,0	28,0
Время паузы	$\tau_{\text{паузы}}, \text{ с}$	87,8	23,6	18,1	41,0	16,4	29,3
Продолжительность цикла	$\tau_{\text{ц}}, \text{ с}$	103,9	61,7	106,8	62,3	229,4	57,3
Скважность	S	6,44	1,62	1,20	2,92	1,08	2,04
Частота циклов	$\omega, 1/\text{час}$	35	58	34	58	16	63
Потребляемая мощность за цикл (без ХХ)	$P_{\text{ц}}, \text{ кВт}$	77,0	305,9	412,1	169,7	460,6	242,7
Потребляемая мощность за цикл – период нагнетания и ХХ	$P_{\text{ц}}, \text{ кВт}$	286,5	401,0	454,0	332,8	478,3	369,3
Рассматриваемый промежуток времени	$\Delta t, \text{ час}$	4	4	4	4	4	4
Потребляемая мощность за этот период, без ХХ	$W_i, \text{ кВт}\cdot\text{час}$	308	1224	1648	679	1842	971
Потребляемая мощность за этот период, с ХХ	$W_i, \text{ кВт}\cdot\text{час}$	1146	1604	1816	1331	1913	1477

Таблица 3

Регулировочные характеристики НС при работе от 2 до 8 насосов

Расчетный параметр	Обозначение	Интервал времени суток, час					
		0-4	4-8	8-12	12-16	16-20	20-24
Число работающих насосов	z	2	6	7	3	8	5
Расход потребителя	$Q_n, \text{ м}^3/\text{мин}$	14	52	68	30	75	42
Относительный параметр потребления	q_v	0,70	0,87	0,97	0,75	0,94	0,84
Время импульса	$\tau_n, \text{ с}$	177,5	133,1	532,5	106,5	213,0	133,1
Время паузы	$\tau_{\text{паузы}}, \text{ с}$	87,8	23,6	18,1	41,0	16,4	29,3
Продолжительность цикла	$\tau_{\text{ц}}, \text{ с}$	265,2	156,7	550,5	147,4	229,4	162,4
Скважность	S	1,49	1,18	1,03	1,38	1,08	1,22
Частота циклов	$\omega, 1/\text{час}$	14	23	7	24	16	22
Потребляемая мощность за цикл (без ХХ)	$P_{\text{ц}}, \text{ кВт}$	83,0	315,9	419,8	179,1	460,6	254,2
Потребляемая мощность за цикл – периода нагнетания и ХХ	$P_{\text{ц}}, \text{ кВт}$	103,5	344,0	426,9	213,6	478,3	282,1
Рассматриваемый промежуток времени	$\Delta t, \text{ час}$	4	4	4	4	4	4
Потребляемая мощность за этот период, без ХХ	$W_i, \text{ кВт}\cdot\text{час}$	332	1264	1679	716	1842	1017
Потребляемая мощность за этот период, с ХХ	$W_i, \text{ кВт}\cdot\text{час}$	414	1376	1708	854	1913	1128

Сравнительные данные потребления мощности при циклической работе 10, 8, от 2 до 8 насосов представлены в табл. 1-3 как с полным отключением, так и с переводом насосов на холостой ход. Сравнительные графики суточных потреблений для этих же режимов представлены

на основании табл. 4 на рис. 4 и 5. Из рис. 4 видно, что наименьшая величина электроэнергии (7393 кВт·час) в сравнении с остальными вариантами была затрачена при работе от 2 до 8 насосов при переводе насосов на холостой ход при нулевой подаче, при этом уменьшается количество циклов. Наименьшая величина электроэнергии в сравнении с остальными вариантами в случае с полным отключением насосов (рис. 5) затрачена при работе 10 насосов в импульсном режиме и составила 6534 кВт·час. При этом частота циклов наибольшая из всех вариантов сравнения.

Для сравнения: работа НС по традиционному способу подачи с отключением насосов (без наличия объемного реципиента) и эксплуатации насосов от 2 до 8 приводит к суммарной потребляемой мощности 7688 кВт·час в сутки.

Таблица 4

Сравнительный анализ суточных потреблений энергии (мощности) и циклов при работе 2÷8, 8, 10 насосов при различных вариантах импульсного режима

Вариант	Режим с полным отключением насосов		Режим с переводом на ХХ	
	W_i , кВт·час	ω , 1/час	W_i , кВт·час	ω , 1/час
10 насосов	10707	64,23	6534	64,23
8 насосов	9288	43,85	6672	43,85
2-8 насосов	7393	17,56	6850	17,56

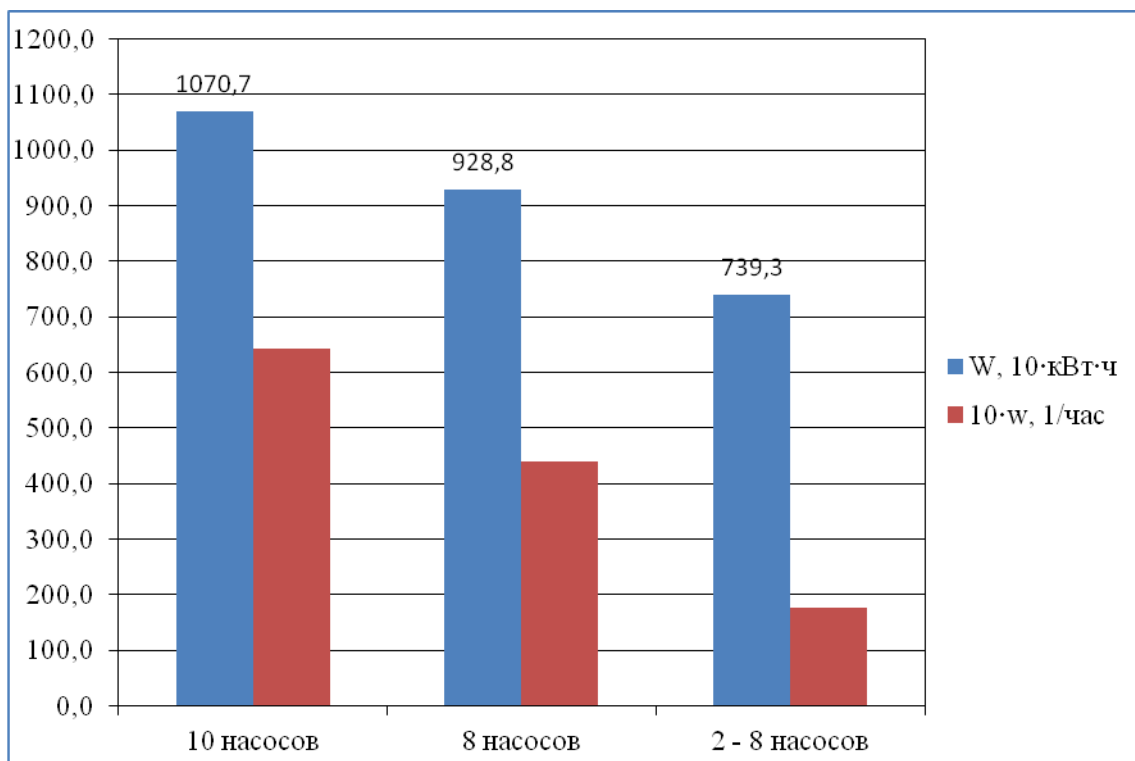


Рис. 4 – Сравнительный анализ суточных потреблений электроэнергии (мощности) и циклов при работе 2÷8, 8, 10 насосов на импульсном режиме с переводом насосов на холостой ход

В импульсном режиме с переходом на ХХ выгодным режимом при наличии аккумуляторной емкости является лишь режим с эксплуатацией насосов от 2 до 8. При этом снижение потребления энергии по сравнению с традиционным составляет чуть менее 4%. Более выгодны режимы всех трех вариантов с импульсной подачей и полным отключением насосов (с наличием реципиента). Наиболее эффективен при этом режим с эксплуатацией 10 насосов с наименьшей частотой импульсов, что подтверждает практически полученные теоретические выводы в работе [17]. При этом разница в эффективности этих трех вариантов составляет лишь 4,6-4,8%.

Кроме того, снижение потребления по сравнению с традиционным способом составляет 10-15%, что существенно.

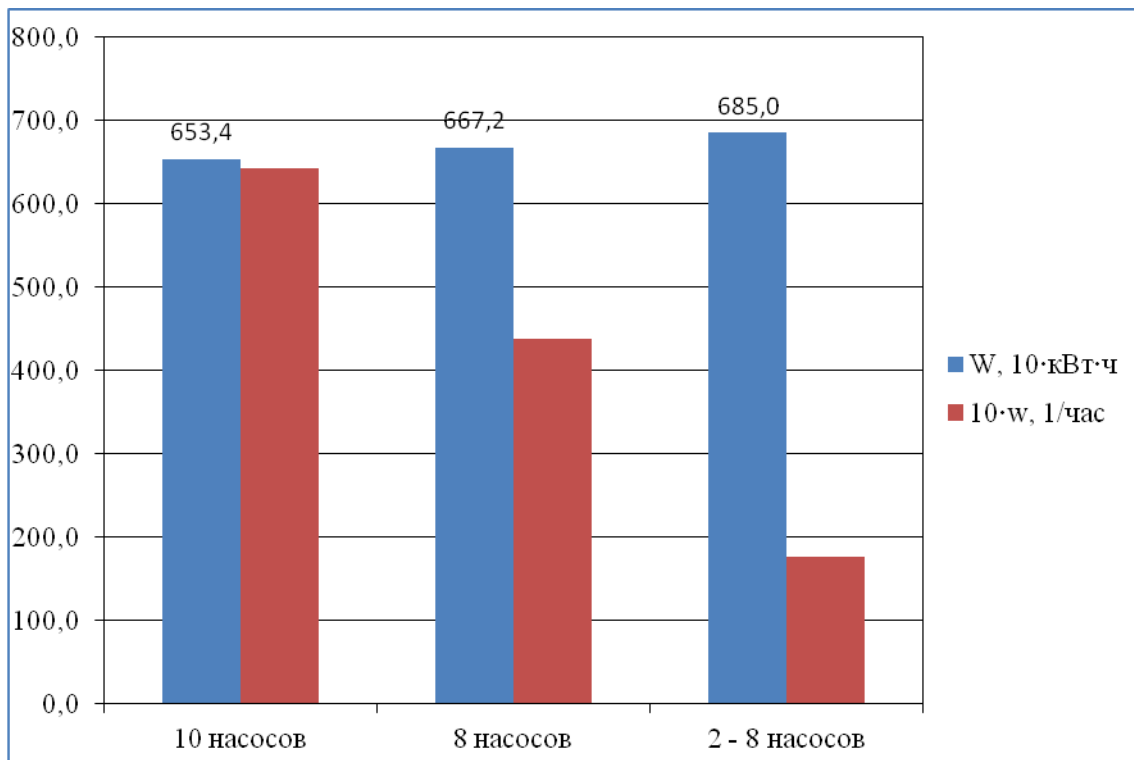


Рис. 5 – Сравнительный анализ суточных потреблений электроэнергии (мощностей) и циклов при работе 2÷8, 8, 10 насосов на импульсном режиме с полным отключением насосов

Таким образом, покрытие суточного графика нагрузок станции более выгодно осуществлять с использованием импульсного режима. Отрицательным моментом такого регулирования может быть лимитирование этого процесса числом «останова–пуска» приводных электродвигателей насосов, которые вносят некоторое ограничение в частотные характеристики импульсов. Этот момент, возможно, может быть обойден подбором параметрических характеристик импульсного регулирования.

В заключении можно отметить, что полученные результаты с успехом могут использоваться техническими работниками при выборе оптимальной эксплуатационной схемы работы агрегатов (насосов) для покрытия графиков нагрузок в короткие сроки без использования сложных вычислительных программных комплексов. Такой подход позволяет минимизировать средний удельный расход электроэнергии и др. Кроме того, эту методику можно использовать для оптимизации работы насосной станции при покрытии ее нагрузки в любой момент времени, а также суточных, сезонных, годовых нагрузок и др.

Выводы

1. Впервые в отечественной практике предпринята попытка создания модели управления насосами НС с существенно переменным режимом работы при использовании циклической подачи рабочей среды.
2. Полученные результаты расчета функциональных параметров импульсного подвода энергии к системам водоснабжения позволяет осуществлять выбор более эффективных конструктивных их характеристик и состава оборудования НС, в т. ч. при проектировании систем водоснабжения.
3. На упрощенных примерах с известным графиком нагрузки НС выполнена численная реализация динамической модели импульсного регулирования насосов, получены результаты в

- виде таблиц и указаны наиболее рациональные комбинации насосов для оптимального режима работы НС.
4. Результаты данной работы могут послужить первым этапом в создании моделей управления нагнетательных станций различного назначения и разной структуры с последующей интеграцией их в системы АСУТП.
 5. При дальнейших исследованиях в рассматриваемом направлении целесообразным является учет неучтенных в работе рабочих характеристик насосов и сети при различных интенсивностях импульсного подвода, что позволит получить более полную картину и разработать более эффективные методы импульсной подачи рабочего тела в системы водоснабжения, в т. ч. для покрытия переменных нагрузок. Целесообразным являются последующие уточнения, которые могут быть сделаны на более совершенных моделях с использованием ЭВМ, что позволит получить более точные и эффективные методики для оптимизации работы НС в системах водоснабжения.
 6. С использованием представленной аналитической (технико-экономической) модели системы нагнетания жидкостей в сеть при переменных нагрузках определены основные параметры, влияющие на состав (долю) и режимы подключения нагнетателей для покрытия нагрузок в пиковой, полупиковой и базовой частях суточного графика нагрузок.

Список использованных источников:

1. Бондаренко Г.А. Инженерная теория регулирования винтовых компрессоров переводом на холостой ход / Г.А. Бондаренко // Вісник Сумського державного університету. – 2003. – № 3 (49). – С. 63-71. – (Серія : Технічні науки).
2. Бондаренко Г.А. Некоторые особенности работы компрессоров на пневмосеть / Г.А. Бондаренко, В.В. Шишов // Проектирование и моделирование. Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – № 1 (11). – С. 62-65.
3. Бондаренко Г.А. Винтовые компрессоры в системах обеспечения сжатым воздухом / Г.А. Бондаренко, П.Е. Жарков. – Сумы: СумГУ. – 2003. – 130 с.
4. Бондаренко Г.А. Винтовые воздушные компрессорные станции / Г.А. Бондаренко. – Сумы : СумГУ, 2003. – 245 с.
5. Штейнмиллер О.А. Статическая и полирежимная оптимизация параметров насосного оборудования системы «районная насосная станция – абонентская сеть» / О.А. Штейнмиллер, А.Н. Ким // Вестник гражданских инженеров. – 2009. – № 2 (19). – С. 41-45.
6. Штейнмиллер О.А. Численные методы решения задачи оптимального синтеза повысительных систем подачи и распределения воды микрорайона / О.А. Штейнмиллер // Вестник гражданских инженеров. – 2009. – № 4 (21). – С. 81-87.
7. Сумароков С.В. Математическое моделирование систем водоснабжения / С.В. Сумароков. – Новосибирск : Наука, 1983. – 167 с.
8. Штейнмиллер О.А. Задача оптимального синтеза повысительных систем подачи и распределения воды (СПРВ) микрорайона / О.А. Штейнмиллер, А.Н. Ким // Вестник гражданских инженеров. – 2009. – № 1 (18). – С. 80-84.
9. Копытин А.Н. Современные подходы в определении эффективности работы насосных агрегатов / А.Н. Копытин, О.Ю. Царинник // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2007. – № 8. – С. 14-16.
10. Костин В.И. Регулирование производительности нагнетателей при смешанной схеме совместной работы / В.И. Костин // Известия ВУЗов. Строительство. – Новосибирск, 2006. – № 6. – С. 61-64.
11. Абрамов Н.Н. Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды / Н.Н. Абрамов. – М. : Стройиздат, 1972. – 288 с.
12. Sarbu I. Energetic optimization of water pumping in distribution systems / I. Sarbu, I. Borza // Periodica Polytechnica. – 1998. – Vol. 42, № 2. – Pp. 141-152. – (Series : Mechanical Engineering).
13. Variable speed drive-based pressure optimization of a pumping system comprising individual branch flow control elements / J. Tamminen, T. Ahonen, A. Kosonen, J. Ahola, J. Tolvanen // 16th European Conference on Power Electronics and Applications (26-28 August 2014; Lappeenranta, Finland). – 2014. – Pp. 1-11. – Mode of access: [DOI: 10.1109/EPE.2014.6910988](https://doi.org/10.1109/EPE.2014.6910988).
14. Vodovozov V. Circulation centrifugal pump with variable speed drives and minimal electricity

- consumption / V. Vodovozov, L. Gevorkov, Z. Raud, // 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG) (4-6 April 2017; Cadiz, Spain). – 2017. – Pp. 334-339. – Mode of access: [DOI: 10.1109/CPE.2017.7915193](https://doi.org/10.1109/CPE.2017.7915193).
15. Market Transformation of Energy-Efficient Technologies in the EU / A.T. Almeida, P. Fonseca, H. Falkner, P. Bertoldi // *Energy Policy*. – 2003. – Vol. 31. – Pp. 563-575. – Mode of access: [DOI: 10.1016/S0301-4215\(02\)00100-3](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00100-3).
16. Frequency-Converter-Based Hybrid Estimation Method for the Centrifugal Pump Operational State / T. Ahonen, J. Tamminen, J. Ahola, J. Kestilä // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2012. – Vol. 59. – Pp. 4803-4809. – Mode of access: [DOI: 10.1109/TIE.2011.2176692](https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2176692).
17. Лухтура Ф.И. О применении импульсной подачи рабочей среды в системы водоснабжения / Ф.И. Лухтура, М.В. Медведева // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 48-57. – (Серія : Нові рішення в сучасних технологіях). – Режим доступу: [DOI: 10.20998/2413-4295.2019.05.07](https://doi.org/10.20998/2413-4295.2019.05.07).
18. О повышении эффективности работы нагнетательных станций / Ф.И. Лухтура, Н.В. Карнаух, М.В. Медведева, В.Ю. Ивашин // *Вісник Приазовського державного технічного університету*. – 2018. – Вип. 37. – С.61-74. – (Серія : Технічні науки). – Режим доступу: [DOI: 10.31498/2225-6733.37.2018.160239](https://doi.org/10.31498/2225-6733.37.2018.160239).

References:

- Bondarenko G.A. Inzhenernaya teoriya regulirovaniya vintovykh kompressorov perevodom na kholostoy khod [Engineering theory of regulation of screw compressors by transfer to idle]. *Vіsник Sums'kogo derzhavnogo unіversitetu – The Sumy State University Bulletin*, 2003, no. 3 (49), pp. 63-71. (Rus.)
- Bondarenko G.A., Shishov V.V. Nekotoryye osobennosti raboty kompressorov na pnevmoset' [Some features of the operation of compressors on the pneumatic network]. *Proyektirovaniye i modelirovaniye. Kompessornoye i energeticheskoye mashinostroyeniye – Design and modeling. Compressor and power engineering*, 2008, no. 1 (11), pp. 62-65. (Rus.)
- Bondarenko G.A., Zharkov P.E. Vintovyye kompressory v sistemakh obespecheniya szhatym vozdukhom [Screw compressors in compressed air supply systems]. Sumy, SumGU Publ., 2003. 130 p. (Rus.)
- Bondarenko G.A. Vintovyye vozdushnyye kompressornyye stantsii [Screw air compressor stations]. Sumy, SumGU Publ., 2003. 245 p. (Rus.)
- Shteynmiller O.A., Kim A.N. Statische i polirezhimnaya optimizatsiya parametrov nasosnogo oborudovaniya sistemy «rayonnaya nasosnaya stantsiya – abonentskaya set'» [Static and multi-mode optimization of the parameters of the pumping equipment of the system «district pumping station – subscriber network»]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2009, no. 2 (19), pp. 41-45. (Rus.)
- Shteynmiller O.A. Chislennyye metody resheniya zadachi optimal'nogo sinteza povysitel'nykh sistem podachi i raspredeleniya vody mikrorayona [Numerical methods for solving the problem of optimal synthesis of upgrading water supply and distribution systems in a microdistrict]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2009, no. 4 (21), pp. 81-87. (Rus.)
- Sumarokov S.V. Matematicheskoye modelirovaniye sistem vodosnabzheniya [Mathematical modeling of water supply systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 167 p. (Rus.)
- Shteynmiller O.A., Kim A.N. Zadacha optimal'nogo sinteza povysitel'nykh sistem podachi i raspredeleniya vody (SPRV) mikrorayona [The task of optimal synthesis of upgrading water supply and distribution systems (SPRV) of the microdistrict]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2009, no. 1 (18), pp. 80-84. (Rus.)
- Kopytin A.N., Tsarinnik O.Yu. Sovremennyye podkhody v opredelenii effektivnosti raboty nasosnykh agregatov [Regulation of supercharger performance with a mixed scheme of joint work]. *Santekhnika, otopleniye, konditsionirovaniye – Plumbing, heating, air conditioning*, 2007, no. 8, pp. 14-16. (Rus.)
- Kostin V.I. Regulirovaniye proizvoditel'nosti nagnetateley pri smeshannoy skheme sovmestnoy raboty [Regulation of supercharger performance with a mixed scheme of joint work]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo – News of universities. Building*, 2006, no. 6, pp. 61-64. (Rus.)

11. Abramov N.N. *Teoriya i metodika rascheta sistem podachi i raspredeleniya vody* [Theory and method of calculating water supply and distribution systems]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972. 288 p. (Rus.)
12. Sarbu I., Borza I. Energetic optimization of water pumping in distribution systems. *Periodica Polytechnica. Series: Mechanical Engineering*, 1998, no. 42, vol. 2, pp. 141-152.
13. Tamminen J., Ahonen T., Kosonen A., Ahola J., Tolvanen J. Variable speed drive-based pressure optimization of a pumping system comprising individual branch flow control elements. 16th European Conference on Power Electronics and Applications, Lappeenranta, Finland, 2014, pp. 1-11. **doi: 10.1109/EPE.2014.6910988.**
14. Vodovozov V., Gevorkov L., Raud Z. Circulation centrifugal pump with variable speed drives and minimal electricity consumption. 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), Cadiz, Spain, 2017, pp. 334-339. **doi: 10.1109/CPE.2017.7915193.**
15. Almeida A.T., Fonseca P., Falkner H., Bertoldi P. Market Transformation of Energy-Efficient Technologies in the EU. *Energy Policy*, 2003, no. 31, pp. 563-575. **doi: 10.1016/S0301-4215(02)00100-3.**
16. Ahonen T., Tamminen J., Ahola J., Kestilä J. Frequency-Converter-Based Hybrid Estimation Method for the Centrifugal Pump Operational State. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, no. 59, pp. 4803-4809. **doi: 10.1109/TIE.2011.2176692.**
17. Lukhtura F. I., Medvedeva M.V. O prymenenyy ymпуль'snoy podachy rabochey sredy v systemy vodosnabzhenyya [On the application of pulsed supply of a working medium to water supply systems]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «Kharkivs'ky politekhnichnyy instytut»*. *Seriya: Novi rishennya v suchasnykh tekhnolohiyakh – Bulletin of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*. *Series: New solutions in modern technologies*, 2019, no. 5 (1330), pp. 48-57. **doi: 10.20998/2413-4295.2019.05.07.** (Rus.)
18. Lukhtura F.I., Karnaukh N.V., Medvedeva M.V., Ivashin V.Yu. O povyshenyy éffektyvnosty raboty nahnetatel'nykh stantsyy [On increasing the efficiency of injection stations]. *Visnyk Pryazovs'koho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu*. *Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2018, iss. 37, pp. 61-74. **doi: 10.31498/2225-6733.37.2018.160239.** (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 21.04.2019