

## СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 628.12

DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-2-9

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА И АНАЛИЗА РЕЖИМОВ РАБОТЫ  
ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ  
В СОСТАВЕ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ*д-р техн. наук, проф. И.В. ВОЙТОВ*ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8851-6834>*(Белорусский государственный технологический университет, Минск)**В.Л. ЕЛОВИК**(УП «Полимерконструкция», Витебск)*

*Рассмотрены разработанные на текущий момент методы расчета режимов работы и энергопотребления центробежными насосами. Проанализирована применимость существующих методик к расчету режимов работы насосного оборудования, работающего с переменной частотой вращения рабочего колеса.*

**Ключевые слова:** *энергоэффективность, частотно-регулируемый привод, водопроводно-канализационное хозяйство, насосный агрегат.*

**Введение.** Вопросам расчета и анализа режимов работы систем подачи и распределения воды (СПРВ) и систем перекачки сточных вод (СПСВ) в целом и насосного оборудования в частности посвящены труды многих исследователей: К. Пфлейдерер (С. Pfleiderer), Е.А. Прегер, Л.Ф. Мошнин, В.Г. Ильин, Н.Н. Абрамов, В.П. Старинский, Б.С. Лезнов, Г.А. Ключникова, А.П. Усачев, Р.А. Кахоров и др. В работах этих и других исследователей приводятся различные подходы, методы анализа, формы математического описания режимов работы СПРВ, СПСВ и входящего в их состав насосного оборудования как с использованием РЭП, так и без него.

Накопленный за последние 20–30 лет эксплуатации РЭП опыт показывает, что не всегда удается с требуемой точностью спрогнозировать эффективность применения РЭП на насосных станциях систем водоснабжения и водоотведения.

В первую очередь это вызвано тем, что существующие на данный момент методические подходы к расчету и анализу режимов работы насосного оборудования не в полной мере позволяют учесть в расчетах все нюансы работы частотно-регулируемых центробежных насосов, а именно: зависимость изменения КПД от частоты вращения рабочего колеса, соблюдение границ рабочей зоны насоса при изменении частоты вращения рабочего колеса, переходные режимы параллельной работы группы насосного оборудования и т.д.

Во вторую очередь – существующие методы и подходы позволяют в качестве результата получать лишь сводные, укрупненные показатели: объем перекаченной воды за расчетный период, объем затраченной на это электроэнергии за расчетный период и т.д.

В третью очередь – в существующих методах, ориентированных на ручной, не автоматизированный расчет, используется ряд допущений и поправочных коэффициентов. Это хоть и упрощает сами расчеты, сводя все, как правило, к одной-двум расчетным формулам, но значительно снижает точность результата.

Рассмотрим более подробно методические подходы к расчету режимов работы центробежных насосов, разработанные на данный момент.

**Зависимости для расчета режимов работы центробежных насосов.** К настоящему времени разработан ряд аналитических зависимостей, характеризующих основные технологические параметры систем подачи и распределения воды. Еще в 30-е годы прошлого столетия немецким исследователем К. Пфлейдерером было предложено уравнение характеристической поверхности (1), которое характеризует напор, развиваемый лопастным насосом в зависимости от требуемой подачи и частоты вращения рабочего колеса [1, с. 211]:

$$H_x = k_1 \cdot n^2 + 2k_2 \cdot n \cdot Q_x - k_3 \cdot Q_x^2, \quad (1)$$

где  $H_x$  – напор (м. вод. ст.), развиваемый насосом для обеспечения подачи  $Q_x$  (м<sup>3</sup>/ч) при частоте вращения рабочего колеса  $n$  (об/мин);

$k_1, k_2, k_3$  – постоянные для каждого отдельного насоса коэффициенты, определяемые исходя из геометрических параметров проточной части насоса [2, с. 432, формулы (10.30)–(10.32)]. Графическое отображение характеристики (1) в осях ( $Q_x, H_x, n$ ) приведено на рисунке 1.

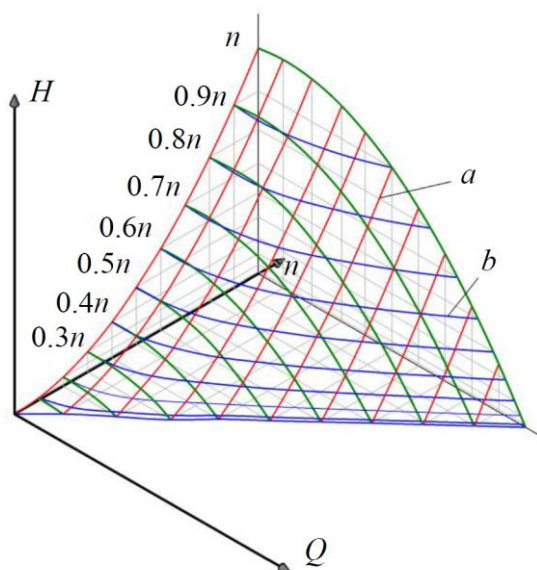
Предложенная характеристическая поверхность позволяет представить работу насоса в режимах, требующих поддержания определенного значения подачи при переменном напоре (кривые семейства *a*) или наоборот, режимы поддержания постоянного напора при переменной подаче (кривые семейства *b*).

Известным российским исследователем Е.А. Прегером предложена методика подбора насосов по уравнениям их характеристик [3]. При помощи аналитических уравнений предлагается определять напор, развиваемый насосом, и потребляемую мощность при переменной подаче:

$$H = a_0 + a_1 \cdot Q + a_2 \cdot Q^2, \quad (2)$$

$$N = b_0 + b_1 \cdot Q + b_2 \cdot Q^2, \quad (3)$$

где  $H$  – развиваемый насосом напор (м. вод. ст.) при подаче  $Q$  (м<sup>3</sup>/ч);  
 $N$  – потребляемая насосом мощность (кВт) при подаче  $Q$  (м<sup>3</sup>/ч);  
 $a_0, a_1, a_2$  и  $b_0, b_1, b_2$  – эмпирические коэффициенты, постоянные для конкретного насоса.



$a$  – кривые равных подач (красные линии);  $b$  – кривая равных напоров (синие линии);  $1n \dots 0.3n$  – напорные характеристики насоса при соответствующей частоте вращения рабочего колеса (зеленые линии)

Рисунок 1. – Характеристическая поверхность центробежного насоса

Пересчет характеристик для режимов работы с переменной частотой производится в соответствии с законом подобия:

$$\frac{Q_p}{Q_n} = \frac{n_p}{n_n}, \quad (4)$$

$$\frac{H_p}{H_n} = \left( \frac{n_p}{n_n} \right)^2, \quad (5)$$

$$\frac{N_p}{N_n} = \left( \frac{n_p}{n_n} \right)^3, \quad (6)$$

где  $Q_n, H_n, N_n$  – подача (м<sup>3</sup>/ч), напор (м. вод. ст.), потребляемая мощность насоса (кВт) при номинальной частоте вращения рабочего колеса  $n_n$  (об/мин);

$Q_p, H_p, N_p$  – подача (м<sup>3</sup>/ч), напор (м. вод. ст.), потребляемая мощность насоса (кВт) при частоте вращения рабочего колеса  $n_p$  (об/мин).

Точность соответствия аналитических характеристик (2) и (3) паспортным составляет 98–99% [4, с. 7].

Уравнения характеристик, предложенные Е.А. Прегером, использованы в полном или упрощенном виде в работах других исследователей.

Значение КПД насоса  $\eta$  в пределах рабочей зоны С.П. Седлуха [5] предложил определять по формуле:

$$\eta = c_0 + c_1 \cdot Q + c_2 \cdot Q^2, \quad (7)$$

где  $c_0, c_1, c_2$  – эмпирические коэффициенты, определяемые аппроксимацией (по методу наименьших квадратов) паспортной характеристики  $Q-\eta$ .

В качестве эквивалентной характеристики системы распределения воды, как правило, всеми исследователями используется уравнение вида (8), которое с определенной степенью допущения характеризует изменение требуемых напоров в системе в зависимости от водопотребления [6].

$$H_{\text{тр}} = H_{\Gamma} + S \cdot Q_{\text{тр}}^2, \quad (8)$$

где  $H_{\Gamma}$  – статический напор, обусловленный разницей отметок источника и приемника воды (м. вод. ст.);

$S \cdot Q^2$  – динамический напор (м. вод. ст.), обусловленный потерями напора в трубопроводах и местных сопротивлениях водоразборной сети при расходе  $Q$  (м<sup>3</sup>/ч);

$S$  – коэффициент гидравлического сопротивления водоразборной сети (м · ч<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>), принимается постоянным во всем диапазоне водопотребления.

**Расчет потребляемой энергии центробежным насосом.** Вопросом потребления энергии насосным оборудованием в процессе эксплуатации СПРВ и СПСВ занимались многие исследователи. На сегодняшний день предложено множество методов определения энергозатрат за расчетный период.

Годовая стоимость электроэнергии  $C_{\text{эл}}$ , затрачиваемая на транспортирование воды, определяется из следующего выражения, предложенного Е.А. Прегером [4, с. 43]:

$$C_{\text{эл}} = 0,955 \cdot \frac{Q_{\text{ср}} \cdot H_{\text{ср}}}{\eta_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{дв}}} \cdot \sigma, \quad (9)$$

где  $Q_{\text{ср}}$  – среднесуточная за год подача насоса (м<sup>3</sup>/сут);

$H_{\text{ср}}$  – средний напор, развиваемый насосом за год (м. вод. ст.);

$\eta_{\text{н}}, \eta_{\text{дв}}$  – КПД насоса и электропривода в долях ед.;

$\sigma$  – текущий тариф на электроэнергию (руб/кВт · ч).

В.Г. Ильиным предложена подобная зависимость для определения годовых затрат электроэнергии  $C_{\Sigma}$  на транспортирование воды в сеть [7, с. 81–83]:

$$C_{\Sigma} = \frac{\sigma}{102 \cdot 3,6 \cdot \eta} \cdot \gamma \cdot H_{\text{н}} \cdot Q_{\text{н}} \cdot 86400 \cdot 365, \quad (10)$$

где  $H_{\text{н}}$  – требуемый напор в начальной точке сети (м. вод. ст.);

$Q_{\text{н}}$  – расход, подаваемый в начальную точку сети (м<sup>3</sup>/сек);

$\sigma$  – текущий тариф на электроэнергию (руб/кВт · ч);

$\gamma$  – коэффициент (доли ед.), учитывающий, какую часть годовых затрат энергии на трение в трубах составляют среднегодовые затраты энергии за срок окупаемости.

86400 – количество секунд в сутках;

365 – количество дней в году.

Л.Ф. Мошным [8] на основании формулы расчета гидравлического сопротивления Н.Н. Павловского предложена зависимость для расчета потребляемой электроэнергии на транспортирование воды по сети за расчетный период  $T$ :

$$\mathcal{E}_{\text{тр сум}} = \frac{1,4822 \cdot 24 \cdot 365}{102 \cdot 10^9} \cdot \frac{\gamma \cdot T}{\eta} \cdot A \cdot l \cdot q^3, \quad (11)$$

где 1,4822 и  $102 \cdot 10^9$  – эмпирические коэффициенты;

24 – количество часов в сутках;

365 – количество дней в году;

$T$  – расчетный срок эксплуатации (лет);

$A$  – величина, характеризуется диаметром трубопровода  $D$  и равняется  $1/D^{5,33}$ ;

$l$  – протяженность сети (м);

$q$  – расход воды (л/сек);

$\eta$  – общий КПД насосного оборудования, подающего воду в систему (доли ед.);

$\gamma$  – коэффициент неравномерности расхода электроэнергии за расчетный период, вызванный неравномерностью водопотребления.

Н.Н. Абрамовым приводится зависимость для определения суммарных затрат энергии на транспортирование воды по СПРВ [9, с. 50]:

$$P = \gamma \cdot S \cdot q_{\text{ср}}^3 \cdot K_{\text{о.ч.}}^3, \quad (12)$$

где  $S$  – удельное энергопотребление (кВт/м<sup>3</sup>);

$q_{\text{ср}}$  – средний за рассматриваемый период расход воды (м<sup>3</sup>/ч);

$K_{\text{о.ч.}}$  – максимальный коэффициент общей часовой неравномерности.

Зависимости, предложенные Е.А. Прегером (9), В.Г. Ильиным (10), Л.Ф. Мошным (11), Н.Н. Абрамовым (12), позволяют оценить приблизительный уровень энергозатрат на транспортирование воды в рассматриваемой СПРВ. Использование поправочных коэффициентов и коэффициентов неравномерности не позволяют учитывать в расчетах фактические особенности рассматриваемой СПРВ или СПСВ, такие как: фактические характеристики насосного оборудования, изменение КПД в зависимости от режима работы и количества параллельно работающих насосных агрегатов. И самое главное – с помощью данных зависимостей не представляется возможным рассчитать энергопотребление при использовании РЭП. Приведенные коэффициенты предусматривают режимы работы насосного оборудования при перемещении рабочей точки по характеристике насоса (регулирование дросселированием) и для режимов с переменной частотой вращения рабочего колеса не подходят. Кроме того, сам коэффициент  $\gamma$ , как показано в работе [5, с. 71], ввиду своей неоднозначности определения может значительно исказить результаты расчетов.

В рекомендациях Департамента по энергоэффективности Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь<sup>1</sup> приводятся зависимости для определения годового расхода электроэнергии как при дросселировании, так и при частотном регулировании:

$$W_H = N_H \cdot T \cdot K_H, \quad (13)$$

$$W = N \cdot T \cdot K_H, \quad (14)$$

где  $W$  и  $W_H$  – годовой расход электроэнергии (кВтч) при частотном регулировании и при дросселировании соответственно;

$N$  и  $N_H$  – мощность на валу насоса (кВт) при частотном регулировании и при дросселировании соответственно, причем  $N_H$  определяется по паспорту насоса, а потребляемая мощность регулируемого насоса по выражению:

$$N = g \cdot \frac{H \cdot Q}{\eta}; \quad (15)$$

$T$  – количество часов работы;

$K_H$  – коэффициент использования. При этом коэффициент  $K_H$  по сути является величиной еще более неопределенной, чем коэффициент  $\gamma$ . Рекомендаций по определению коэффициента  $K_H$  в методических указаниях Департамента по энергоэффективности не приводится.

Очевидно, что расчет годового расхода электроэнергии по зависимостям (13), (14) можно использовать для весьма приближенных расчетов насосного оборудования, работающего в постоянном режиме (с постоянной частотой) на протяжении всего времени  $T$ .

**Расчет режимов и потребляемой энергии частотно-регулируемым центробежным насосом.** В работах Б.С. Лезнова [6; 11] предложен метод расчета потребляемой энергии за расчетный период как при частотном регулировании, так и при дросселировании. Выражение, определяющее затраты энергии частотно-регулируемого насоса, имеет вид [10, с. 38]:

$$W = \frac{N_6 \cdot T \cdot (1 + \lambda)}{\eta_{эд} \cdot 4} \cdot \left[ (1 + H^*) + \lambda^2 \cdot (1 - H^*) \right], \quad (16)$$

где  $N_6$  – мощность, потребляемая насосом (насосной станцией) при наибольшей подаче (кВт);

$H^*$  – относительное противодавление  $H^*_п$  при частотном регулировании или относительный фиктивный напор  $H^*_ф$  при дросселировании;

$T$  – продолжительность расчетного периода (ч);

$\lambda$  – относительная минимальная подача;

$\eta_{эд}$  – КПД электродвигателя (доли ед.).

Экономии электроэнергии за расчетный период предлагается определять, используя выражение [12, с. 46]:

$$W_{рез} = \frac{1}{\eta_{эд}} \cdot N_6 \cdot T \cdot \left[ w^*_д - (1 + \zeta - \eta_{пр}) \right] \cdot \varphi, \quad (17)$$

где  $w^*_д$  – относительные потери энергии при дросселировании насосов, определяемые графически по номограммам [11, рисунок 3.1];

$\zeta$  – коэффициент, учитывающий дополнительные потери в приводе (0,02–0,03);

$\varphi$  – понижающий коэффициент, принимаемый от количества рабочих насосных агрегатов;

$\eta_{пр}$  – КПД частотного преобразователя (доли ед.).

Данные зависимости, по словам Б.С. Лезнова, позволяют с отклонением в 10–15% от фактических значений рассчитывать энергопотребление насосной станции за расчетный период как с использованием РЭП, так и без него. Но заявленная точность обеспечивается только при соблюдении ряда допущений, описанных в [11, с. 7–10]. Далее приведены особо критические, по мнению авторов, из них: а) КПД центробежного насоса принимается постоян-

<sup>1</sup> URL: [https://energoeffect.gov.by/supervision/framework/20201118\\_tepem2](https://energoeffect.gov.by/supervision/framework/20201118_tepem2).

ным как при изменении частоты вращения рабочего колеса, так и при изменении числа параллельно работающих насосов; б) насосы должны быть подобраны таким образом, что оптимальная подача насосов ( $\text{КПД}=\text{max}$ ) соответствует максимальной подаче насоса; в) значения относительного противодавления  $H^*_{\text{п}}$  находятся в пределах 0,5–0,6. На практике обеспечить соблюдение данных условий затруднительно, т.к. диапазоны работы центробежных насосов как по спектру их применения, так и по их номенклатуре весьма широки.

Помимо вышесказанного, данная методика не учитывает:

- работу разнотипного насосного оборудования в составе насосной станции;
- последовательность включения/выключения каждого насосного агрегата;
- работу параллельно нескольких насосных агрегатов, оборудованных ЧРЭП. Таким образом, произвести

детальный анализ работы насосного оборудования не представляется возможным, также невозможно оценить и, следовательно, оптимизировать алгоритмы управления насосными агрегатами.

А.П. Гришин в своих исследованиях [12] рассматривает режимы работы насосного оборудования в системах сельскохозяйственного водоснабжения. При этом делается достаточно глубокий анализ неравномерности водопотребления и его влияния на основные характеристики параллельно работающего насосного оборудования, как регулируемого, так и нерегулируемого. Уделено большое внимание изменению КПД регулируемого насоса и статистическому обоснованию распределения водопотребления во всем диапазоне регулирования.

Приведены аналитические зависимости для расчета энергопотребления регулируемого насоса:

$$W(H(q_v)) = \tau \cdot H_{\text{ст}} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{q_{vi}}{\eta_{\text{эни}}(q_{vi})} \cdot (f_{\delta q}(q_{vi})), \quad (18)$$

где  $\tau$  – время работы регулируемого насоса (ч);

$H_{\text{ст}}$  – требуемый напор в системе и принимаемый постоянным для данного режима (м. вод. ст.);

$q_{vi}$  – случайное значение водопотребления ( $\text{м}^3/\text{ч}$ );

$\eta_{\text{эни}}(q_{vi})$  – КПД насоса, соответствующий водопотреблению ( $q_{vi}$ ) (доли ед.);

$f_{\delta q}(q_{vi})$  – функция плотности распределения водопотребления ( $q_{vi}$ ).

Предложенная А.П. Гришиным методика рассматривает энергопотребление одиночного насоса без возможности учета параллельной работы группы насосов. Кроме того, выражение (18) позволяет учитывать только стабилизацию давления на напорном коллекторе насосной станции (оголовке артезианской скважины). В условиях водоснабжения сельскохозяйственных объектов, вполне возможно, этого и достаточно, но для расчета СПРВ и СПСВ населенных мест и промышленных предприятий не применимо [5].

Методика, предложенная А.П. Усачевым [13], основана на следующих положениях:

а) наличие исходных данных: паспортные характеристики насосных агрегатов, работающих в составе рассматриваемой насосной станции, информация по фактическим режимам работы насосной станции (водопотреблению) за расчетный период (год), действующие тарифы на электроэнергию;

б) расчет потребляемой мощности  $N_i$  (кВт) для каждого возможного режима работы каждого насосного агрегата, входящего в насосную станцию, определяется исходя из выражения:

$$N_i = \frac{Q_i \cdot H_i}{367 \cdot \eta_{\text{нас}} \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{пч}} \cdot k}, \quad (19)$$

где  $Q_i$  – производительность насоса в рассматриваемом режиме ( $\text{м}^3/\text{ч}$ );

$H_i$  – развиваемый насосом напор в рассматриваемом режиме (м. вод. ст.);

$\eta_{\text{нас}}$  – КПД насоса в рассматриваемом режиме (доли ед.);

$\eta_{\text{дв}}$  – КПД электродвигателя (доли ед.);

$\eta_{\text{пч}}$  – КПД ПЧТ (доли ед.);

$k$  – коэффициент износа насосного агрегата. Потребляемая мощность рассчитывается для режимов работы при дроссельном регулировании  $N_{\text{дри}}$  и при частотном регулировании  $N_{\text{чри}}$ ;

в) для каждого режима вычисляется снижение потребляемой мощности  $\Delta N_i$  (кВт):

$$\Delta N_i = N_{\text{дри}} - N_{\text{чри}}; \quad (20)$$

г) вычисляется экономия электроэнергии  $\Delta E_T$  (кВт) за расчетный период (год):

$$\Delta E_T = \sum_{i=1}^n (\Delta N_i \cdot T), \quad (21)$$

где  $n$  – число рассматриваемых режимов за расчетный период  $T$  (ч).

д) на основании полученной экономии электроэнергии и действующих тарифов определяется срок окупаемости мероприятий по внедрению регулируемого привода и определяется экономическая эффективность его внедрения.

При всей видимой простоте приведенного алгоритма специалист, производящий фактические расчеты, неизбежно сталкивается с рядом вопросов, не имеющих ответа в работах А.П. Усачева:

а) какой порядок определения режимов работы насосного оборудования и их количества?

б) как (графически или аналитически) и по каким зависимостям (если аналитически) производится определение координат характеристик насосного оборудования  $Q_i$ ,  $H_i$ ,  $\eta_{нас}$ ,  $\eta_{дв}$ ,  $\eta_{пч}$  и  $k$  в рассматриваемых режимах?

Кроме того, следует также учитывать, что в предлагаемой методике А.П. Усачева принимается:  $\eta_{нас}$  – постоянным (равным номинальному) и независимым от частоты вращения рабочего колеса, а давление  $H_{тр}$  – постоянным и равным требуемому напору при максимальной расчетной подаче.

На основании изложенного данная методика трудно применима на практике как при проектировании новых объектов, так и при оценке внедрения РЭП на действующих объектах.

Г.А. Ключниковой<sup>2</sup> предложен подход к оптимизации режимов работы электроприводов насосных агрегатов НС систем теплофикации. В основе оптимизации лежит метод планирования эксперимента с решением задачи однокритериального выбора. Результатом решения оптимизационной задачи является определение режима работы насосного оборудования с минимальными затратами электроэнергии в статических условиях при постоянном расходе и напоре. При изменении требуемых расхода или напора оптимизационную задачу следует решать заново. Использование такого подхода к оптимизации режимов работы насосных станций во всем диапазоне работы СПРВ и СПСВ представляется задачей достаточно объемной и трудоемкой.

Также следует понимать, что в основе определения критериев оптимизации рассматриваемой электро-механо-гидравлической модели с использованием адаптированного уравнения Эйлера-Лагранжа 2-го порядка ориентир на системы теплоснабжения, имеющие значительные отличия от СПРВ и тем более СПСВ.

Р.А. Кахоровым<sup>3</sup> предложена методика и алгоритм вариативной оптимизации электроприводных систем насосных станций систем водоснабжения. Основной уклон при анализе режимов работы автором делается на переходных режимах (режимах изменения количества работающих насосных агрегатов). На основе результатов такого анализа и принимается решение о выборе способа регулирования работы насосной станции. При этом расчет потребляемой электроэнергии рекомендуется проводить при помощи методики [11], разработанной Б.С. Лезновым [14].

**Заключение. Основные возможности существующих методов и методик расчета энергопотребления центробежных насосов.** На основании вышеизложенного существующие на сегодняшний день методологические подходы, методы и методики расчета и анализа режимов работы центробежных насосов СПРВ и СПСВ и энергопотребления центробежных насосов за расчетный период можно объединить в несколько общих групп.

**Группа 1.** Методы и подходы, основанные на анализе работы водопроводных сетей (система распределения воды) и требуемой энергии на преодоление всех сопротивлений по длине трубопроводов, в фитингах, фасонных частях и водопроводной арматуре при транспортировании расчетного количества воды. Тип, марки, режимы работы и способы регулирования насосного оборудования в расчетах не учитываются. Позволяют сделать очень приблизительный расчет энергопотребления СПРВ и СПСВ.

**Группа 2.** Методы и подходы, позволяющие рассмотреть и проанализировать отдельные режимы работы центробежного насоса в составе насосной станции. Как правило, расчет сводится к определению потребляемой мощности в каждом из рассматриваемых режимов при том или ином способе регулирования. Потребляемая энергия за расчетный период выражается как сумма потребляемых мощностей во всех возможных режимах работы за расчетный период. Использование таких подходов сопряжено с высокой трудоемкостью даже при использовании современной вычислительной техники из-за необходимости ручной подготовки большого объема (по количеству расчетных режимов) исходной информации.

**Группа 3.** Методики, позволяющие рассчитать и проанализировать энергопотребление насосной станции СПРВ или СПСВ за расчетный период. Из-за ряда допусков и упрощений обладают невысокой точностью расчетов (погрешность 15–20%). Из-за особенностей математических подходов не позволяют учитывать в расчетах порядок изменения рабочих насосных агрегатов, использование разнотипных насосных агрегатов, комбинированные способы регулирования. По этим причинам пригодны только для общей укрупненной оценки энергоэффективности базовых решений по внедрению современных способов и алгоритмов управления центробежными насосами.

Исходя из широкого применения регулируемого привода на основе ПЧТ, высокой потенциальной энергоэффективности от его применения на центробежных насосах СПРВ и СПСВ ни одна из вышеперечисленных групп не может удовлетворить потребность в оценке и анализе режимов работы центробежных насосов с РЭП. Для обоснованного выбора способа регулирования недостаточно определить потенциальную экономию энергии от тех или иных мероприятий. Из-за того, что при частотном регулировании режимные точки насосов перемещаются не только по номинальной характеристике насоса, а по всей рабочей области СПРВ, необходимо иметь возможность:

– отслеживать соблюдение допустимых границ работы насосного оборудования, определяемых производителем;

<sup>2</sup> Ключникова, Г.А. Энергетическая оптимизация режимов работы электроприводов насосных станций : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Г.А. Ключникова. – М., 2000. – 164 л.

<sup>3</sup> Кахоров, Р.А. Исследование и оптимизация динамических процессов в электроприводных системах насосных станций : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Р.А. Кахаров. – СПб., 2019. – 136 л.

- отслеживать и анализировать изменение режимов работы насосного оборудования при изменении порядка включения/выключения насосных агрегатов при параллельной работе;
- как можно больше сократить использование ручного труда с максимальной цифровизацией процесса расчетов.

Для этого необходима разработка соответствующих методических основ технологического и энергетического моделирования режимов работы центробежных насосов, оборудованных частотно-регулируемым электроприводом, в составе систем подачи и распределения воды и систем перекачки сточных вод населенных мест, промышленных и сельскохозяйственных предприятий [15].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пфлейдерер, К. Лопаточные машины для жидкостей и газов. Водяные насосы, вентиляторы, турбовоздуходувки, турбокомпрессоры / К. Пфлейдерер ; пер. с нем. А.М. Ладогина ; под ред. В.И. Поликовского. – 4-е изд., перераб. – М. : Mashgiz, 1960. – 685 с.
2. Пфлейдерер, К. Центробежные и пропеллерные насосы : учеб. пособие для вузов / К. Пфлейдерер ; пер. с нем. В.И. Поликовского, В.К. Рерих, К.А. Ушакова. – Л. : ОНТИ-НКТП СССР, 1937. – 495 с.
3. Прегер, Е.А. Подбор лопатных насосов по уравнениям их характеристик. Информационно-технический листок № 23 (46) / Е.А. Прегер. – Л. : Ленинградский дом научно-технической пропаганды, 1954. – 15 с.
4. Прегер, Е.А. Проектирование водопроводных и канализационных насосных станций : учеб. пособие / Е.А. Прегер, А.И. Кораблев. – Л. : ЛИСИ, 1979. – 63 с.
5. Седлуха, С.П. Методика расчета затрат энергии на подачу воды при оборудовании насосной станции регулируемые и нерегулируемые насосами / С.П. Седлуха // Вода и экология. Проблемы и решения. – 2001. – № 3 (8). – С. 71–83.
6. Лезнов, Б.С. Характеристики разветвленных трубопроводов с промежуточными отборами воды / Б.С. Лезнов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2007. – № 12. – С. 37–39.
7. Ильин, В.Г. Расчет совместной работы насосов водопроводных сетей и резервуаров / В.Г. Ильин. – Киев : Госстройиздат УССР, 1963. – 136 с.
8. Мошнин, Л.Ф. Методы технико-экономического расчета водопроводных сетей / Л.Ф. Мошнин. – М. : Стройиздат, 1950. – 144 с.
9. Расчет водопроводных сетей : учеб. пособие для вузов / Н.Н. Абрамов [и др.]. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1983. – 278 с.
10. Лезнов, Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок / Б.С. Лезнов. – М. : Машиностроение, 2013. – 176 с.
11. Лезнов, Б.С. Методика оценки эффективности применения регулируемого электропривода в водопроводных и канализационных насосных установках / Б.С. Лезнов. – М. : Машиностроение, 2011. – 88 с.
12. Методические рекомендации по выбору оборудования для частотно-регулируемой насосной станции второго подъема с комбинированной компоновочной схемой / А.П. Гришин [и др.]. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2006 – 74 с.
13. Усачев, А.П. Методика оценки эффективности частотного регулирования производительности насосных агрегатов / А.П. Усачев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2018. – № 7. – С. 57–63.
14. Вариативная оптимизация электроприводных систем насосных агрегатов / А.А. Прокопов [и др.] // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2018. – № 6 – С. 33–42.
15. Еловик, В.Л. Методика расчета и анализа режимов работы насосных агрегатов, оборудованных регулируемым электроприводом / В.Л. Еловик // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2019. – № 2. – С. 204–213.

#### REFERENCES

1. Pfleiderer, K. (1960). *Lopatochnye mashiny dlya zhidkosti i gazov. Vodyanye nasosy, ventilyatory, turbvozdukhoduvki, turbokompressory*. Moscow: Mashgiz. (In Russ.).
2. Pfleiderer, K. (1937). *Tsentrobezhnye i propellernye nasosy*. Leningrad: ONTI-NKTP SSSR. (In Russ.).
3. Preger, E.A. (1954). *Podbor lopastnykh nasosov po uravneniyam ikh kharakteristik. Informatsionno-tekhnicheskii listok № 23 (46)*. Leningrad: Leningradskii dom nauchno-tekhnicheskoi propagandy. (In Russ.).
4. Preger, E.A. & Korablev, A.I. (1979). *Proektirovanie vodoprovodnykh i kanalizatsionnykh nasosnykh stantsii*. Leningrad: LISI. (In Russ.).
5. Sedlukha, S.P. (2001). Metodika rascheta zatrat energii na podachu vody pri oborudovanii nasosnoi stantsii reguliruemyi i nereguliruemyi nasosami. *Voda i ekologiya. Problemy i resheniya [Water and Ecology]*, (3), 71–83. (In Russ.).
6. Leznov, B.S. (2007). Kharakteristiki razvetvlennykh truboprovodov s promezhutochnymi otborami vody. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water Supply and Sanitary Technique]*, (12), 37–39. (In Russ.).
7. Il'in, V.G. (1963). *Raschet sovmestnoi raboty nasosov vodoprovodnykh setei i rezervuarov*. Kiev: Gosstroizdat USSR. (In Russ.).
8. Moshnin, L.F. (1950). *Metody tekhniko-ekonomicheskogo rascheta vodoprovodnykh setei*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
9. Abramov, N.N., Pospelova, M.M., Somov, M.A., Varapaev, V.N. & Kerimova, D.Kh. (1983). *Raschet vodoprovodnykh setei*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
10. Leznov, B.S. (2013). *Chastotno-reguliruemyi elektroprivod nasosnykh ustanovok*. Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.).
11. Leznov, B.S. (2011). *Metodika otsenki effektivnosti primeneniya reguliruемого elektroprivoda v vodoprovodnykh i kanalizatsionnykh nasosnykh ustanovkakh*. Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.).
12. Grishin, A.P., Avramenko, M.V., Grishin, V.A., Bolkhovitinov, Yu.B. & Grishin, A.A. (2006). *Metodicheskie rekomendatsii po vyboru oborudovaniya dlya chastotno-reguliruemoi nasosnoi stantsii vtorogo pod"ema s kombinirovannoi komponovochnoi skhemoi*. Moscow: GNU VIESKh. (In Russ.).
13. Usachev, A.P. (2018). Metodika otsenki effektivnosti chastotnogo regulirovaniya proizvoditel'nosti nasosnykh agregatov [Method of estimating the efficiency of pumping unit frequency regulation]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water Supply and Sanitary Technique]*, (7), 57–63. (In Russ., abstr. in Engl.).

14. Prokopov, A.A., Kakhorov, R.A., Novikov, V.A. & Belyaev, T.E. (2018). Variativnaya optimizatsiya elektroprivodnykh sistem nasosnykh agregatov [Variative optimization of electric drive systems pumping units]. *Izvestiya SPbGETU «LETI» [Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University]*, (6), 33–42. (In Russ., abstr. in Engl.).
15. Elovik, V.L. (2019). Metodika rascheta i analiza rezhimov raboty nasosnykh agregatov, oborudovannykh reguliruemym elektroprivodom [Calculation and analyses methodology of the working conditions of pumping units, equipped with adjustable drive]. *Trudy BGTU. Ser. 2, Khimicheskie tekhnologii, biotekhnologii, geokologiya [Proceedings of BSTU. Ser. 2, Chemical technologies, biotechnologies, geoecology]*, (2), 204–213. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 12.05.2022

**MODERN METHODS FOR CALCULATION AND ANALYSIS OF THE OPERATING MODES  
OF CENTRIFUGAL PUMPS WITH VARIABLE DRIVE AS A PART OF WATER SUPPLY  
AND WATER DRAINAGE SYSTEMS**

**I. VOITOV, V. YALOVIK**

*The methods developed by the current time for calculating the operating modes and energy consumption of centrifugal pumps are considered. The applicability of existing methods to the calculation of operating modes of pumping equipment operating with a variable speed of the impeller is analyzed.*

**Keywords:** *energy efficiency, frequency-controlled drive, water supply and sewerage, pumping unit.*