

УДК 628.12

DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-10-26

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ В СИСТЕМАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

*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)

В статье рассмотрены примеры расчета режимов работы центробежного насоса системы подачи и распределения воды с помощью вновь разработанной авторами методики. Приведены основные моменты расчета и анализа технологических, энергетических и экологических параметров, характеризующих работу центробежных насосов систем подачи и распределения воды.

Ключевые слова: энергоэффективность, системы подачи и распределения воды, насосный агрегат, частотно-регулируемый привод, дросселирование, условное топливо, парниковые газы, углеродная нейтральность.

Введение. Обоснованное внедрение частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭП) на насосных станциях систем подачи и распределения воды (СПРВ) и систем перекачки сточных вод (СПСВ) позволяет значительно снизить энергозатраты на транспортирование воды потребителю. Это подтверждается более чем тридцатилетним опытом широкой эксплуатации ЧРЭП в системах водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ)¹ [1; 2; 6; 9; 11]. Однако проблема разработки теоретического обоснования подбора центробежных насосов с ЧРЭП пока еще до конца не решена и продолжает оставаться актуальной [3]. Ранее авторами были разработаны методические основы, позволяющие выполнять оценку энергетической эффективности и меняющегося воздействия на окружающую среду при внедрении ЧРЭП на насосных станциях систем водоснабжения и канализации² [3; 4]. В данной статье рассмотрены примеры расчета режимов работы центробежных насосов с ЧРЭП с использованием этих методических основ и выполнено их сравнение с методикой, предложенной Б.С. Лезновым [6; 7].

Исходные данные. В качестве исходных данных для подбора насосного оборудования, расчета и анализа режимов его работы и эффекта энергосбережения приняты следующие положения и допущения:

- рассматривается СПРВ населенного пункта с расчетным числом жителей (РЧЖ) – 35 тыс. чел.;
- среднесуточное водопотребление составляет $Q_{\text{ср.сут}} = 7780,1 \text{ м}^3/\text{сут}$;
- максимальное часовое водопотребление – $Q_{\text{max}} = 746,6 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- среднечасовое водопотребление – $Q_{\text{ср}} = 324,2 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- минимальное часовое водопотребление – $Q_{\text{min}} = 96,3 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- требуемый напор у насосной станции, необходимый для обеспечения максимального водопотребления, – $H_{\text{max}} = 0,34 \text{ МПа}$;

– разница отметок требуемого пьезометра в диктующей точке и уровня воды в резервуаре чистой воды (РЧВ) – $H_{\Gamma} = 15 \text{ м}$;

– коэффициенты суточной неравномерности³ – $K_{\text{min}} = 0,9$ и $K_{\text{max}} = 1,2$;

– коэффициенты, учитывающие степень благоустройства жилой застройки населенного пункта, режим работы его предприятий и другие местные условия⁴ – $\alpha_{\text{min}} = 0,6$ и $\alpha_{\text{max}} = 1,4$, $\beta_{\text{min}} = 0,55$ и $\beta_{\text{max}} = 1,175$;

– требуемое давление поддерживается в диктующей точке системы распределения воды;

– расчетный период T – 1 год, или 8760 ч.

Определение аналитических характеристик СПРВ и расчетных режимов водопотребления. Аналитическая характеристика системы распределения воды (водопроводной сети) определяется уравнением эквивалентной характеристики [7, с. 23]. При этом коэффициент удельного гидравлического сопротивления водоразборной сети S принимается постоянным во всем диапазоне величин водопотребления и определяется из выражения (1):

$$S = \frac{H_{\text{max}} - H_{\Gamma}}{Q_{\text{max}}^2} = \frac{34 - 15}{746,6^2} = 0,00003588 \text{ м} \cdot \text{ч}^2 / \text{м}^6 ; \quad (1)$$

$$H_{\text{тр}} = H_{\Gamma} + S \cdot Q_{\text{тр}}^2 = 15 + 0,00003588 \cdot Q_{\text{тр}}^2.$$

¹ Кахоров, Р.А. Исследование и оптимизация динамических процессов в электроприводных системах насосных станций : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Р.А. Кахоров. – СПб., 2019. – 136 л.

² Еловик, В.Л. Методика определения эффективности применения регулируемых приводов насосных агрегатов / В.Л. Еловик // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Третьей междунар. науч.-техн. конф. : в 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б.М. Хрусталева, Ф.А. Романюк, А.С. Калиниченко. – Минск, 2006. – Т. 1. – С. 105–107.

³ Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-4.01-320-2018 (33020). – Введ. 01.10.18. – Минск : Минстройархитектуры, 2018. – 76 с.

⁴ См. сноску 3.

Для подбора насосного оборудования необходимо определить значение величины водопотребления с наибольшей вероятностью возникновения Q_{pm} . Для этого воспользуемся методом трехпараметрического гамма-распределения для построения статистических кривых распределения и обеспеченности водопотребления [8]. Коэффициенты изменчивости C_v и асимметрии C_s значений водопотребления принимаются равными, определяемыми следующим образом:

$$C_v = C_s = 0,45 + 0,15 \cdot \frac{K_{\max}}{K_{\min}} + 0,55 \cdot \left(\frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\min}} - 1 \right) - 0,075 \cdot \sqrt{\log \text{РЧЖ}} \cdot \ln \text{РЧЖ} =$$

$$= 0,45 + 0,15 \cdot \frac{1,2}{0,9} + 0,55 \cdot \left(\frac{1,4}{0,6} - 1 \right) - 0,075 \cdot \sqrt{\log 35} \cdot \ln 35 = 0,43. \quad (2)$$

С использованием данных [8, с. 197, приложение 1] строятся кривые вероятности возникновения водопотребления и его распределения для значений $C_v = C_s = 0,43$, ограниченные по краям слева и справа значениями соответственно минимального, Q_{\min} , и максимального, Q_{\max} , расчетного водопотребления.

Кривая обеспеченности аппроксимируется полиномом 5-й степени с величиной достоверности $R^2 = 1$:

$$p_i = a + b \cdot Q_{\text{тр}} + c \cdot Q_{\text{тр}}^2 + d \cdot Q_{\text{тр}}^3 + e \cdot Q_{\text{тр}}^4 + f \cdot Q_{\text{тр}}^5. \quad (3)$$

Коэффициенты аппроксимации, входящие в уравнение (3), получены эмпирическим путем и приведены в таблице 1. Результаты расчета кривых обеспеченности и вероятности водопотребления приведены в таблице 2.

Значение водопотребления с наибольшей вероятностью возникновения Q_{pm} имеет значение 274,5 м³/ч при $Q_{\text{ср}} = 324,2$ м³/ч.

Далее, руководствуясь общими рекомендациями по подбору центробежных насосов [5, п. 1.13], производим подбор насосного оборудования (рисунок 1).

Таблица 1. – Эмпирические коэффициенты аппроксимации кривой обеспеченности водопотребления

<i>a</i>	84,5
<i>b</i>	0,341521232
<i>c</i>	-0,002670826
<i>d</i>	4,82667E-06
<i>e</i>	-3,11939E-09
<i>f</i>	4,73855E-13

Таблица 2. – Результаты расчетов обеспеченности и вероятности водопотребления

Водопотребление $Q_{\text{тр}}$, м ³ /ч	Обеспеченность p , %	Вероятность Δp , %
96,3	96,7	2,0
113,5	95,5	3,0
148,7	90,9	5,2
198,3	80,7	8,2
218,8	75,7	9,5
238,1	70,6	10,2
274,5	60,7	10,7
309,8	51,1	10,4
347,1	41,2	9,6
388,3	31,3	8,0
410,4	26,5	7,1
437,0	21,2	6,1
506,7	10,6	4,0
563,7	5,3	2,4
604,0	3,2	1,6
676,0	1,5	0,5
718,3	0,9	0,2
746,6	0,4	0,2

Для заданных условий принимаем следующий комплект рабочих насосов: один регулируемый насосный агрегат – Д125-400В с ЧРЭП установленной мощностью 55 кВт и два нерегулируемых насосных агрегата – Д125-400В-а с электроприводом установленной мощностью 45 кВт.

Для принятой группы насосов был проведен расчет на соответствие критерию энергоэффективной работы:

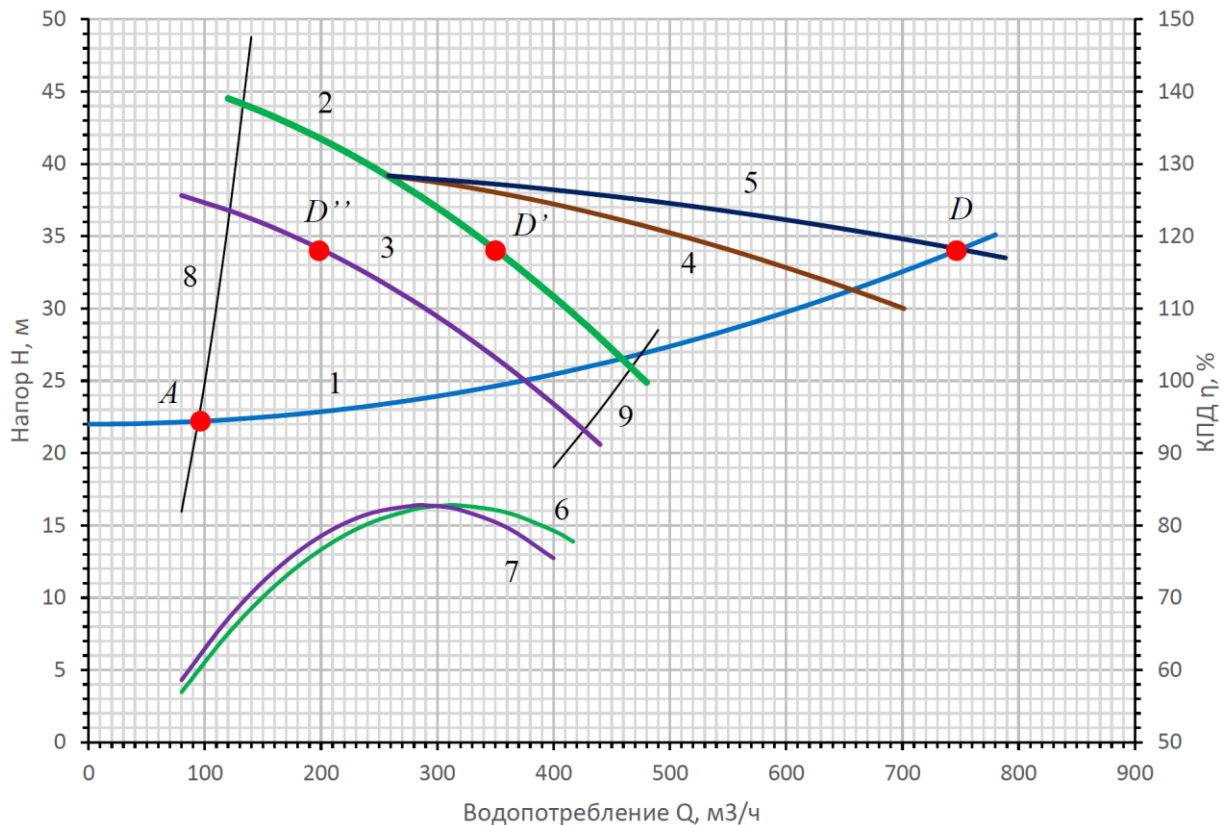
$$Q_{\text{опт}} = Q_{\text{опт}}^{\text{НОМ}} \cdot \frac{n_{\text{НОМ}}}{n_{\text{pm}}} = 320 \cdot \frac{1485}{1188} = 256 \text{ м}^3/\text{ч},$$

где $Q_{\text{ОПТ}}^{\text{НОМ}}$ – производительность в м³/ч регулируемого насоса при максимальном КПД и номинальной скорости вращения рабочего колеса;

$n_{\text{НОМ}}$ – номинальная скорость вращения рабочего колеса в об/мин;

$n_{\text{рп}}$ – скорость вращения рабочего колеса в об/мин при обеспечении $Q_{\text{рп}}$.

Из таблицы 2 видно, что значение оптимальной производительности регулируемого насоса при поддержании требуемого напора в системе распределения воды (256 м³/ч), полученное путем интерполяции табличных значений, находится в зоне максимальных вероятностей возникновения (расчетная вероятность возникновения – 10,4% при максимальной 10,7%).



1 – характеристика $Q-H$ системы распределения воды; 2 – характеристика $Q-H$ регулируемого насоса Д125-400В с ЧРЭП; 3 – характеристика $Q-H$ нерегулируемого насоса Д125-400В-а; 4 – суммарная характеристика $Q-H$ параллельной работы регулируемого (при номинальной частоте вращения рабочего колеса) и нерегулируемого насосов; 5 – суммарная характеристика $Q-H$ параллельной работы регулируемого (при номинальной частоте вращения рабочего колеса) и двух нерегулируемых насосов; 6 – характеристика $Q-\eta$ (КПД) регулируемого насоса Д125-400В с ЧРЭП; 7 – характеристика $Q-\eta$ (КПД) нерегулируемого насоса Д125-400В-а; 8 – левая граница рабочей зоны насосов; 9 – правая граница рабочей зоны насосов; A – минимальное расчетное водопотребление Q_{min} ; D – максимальное расчетное водопотребление Q_{max} ; D' – режимная точка подбора регулируемого насоса Д125-400В с ЧРЭП; D'' – то же нерегулируемого насоса Д125-400В-а.

Рисунок 1. – Результаты подбора центробежных насосов

Степень разнотипности τ определяем отношением:

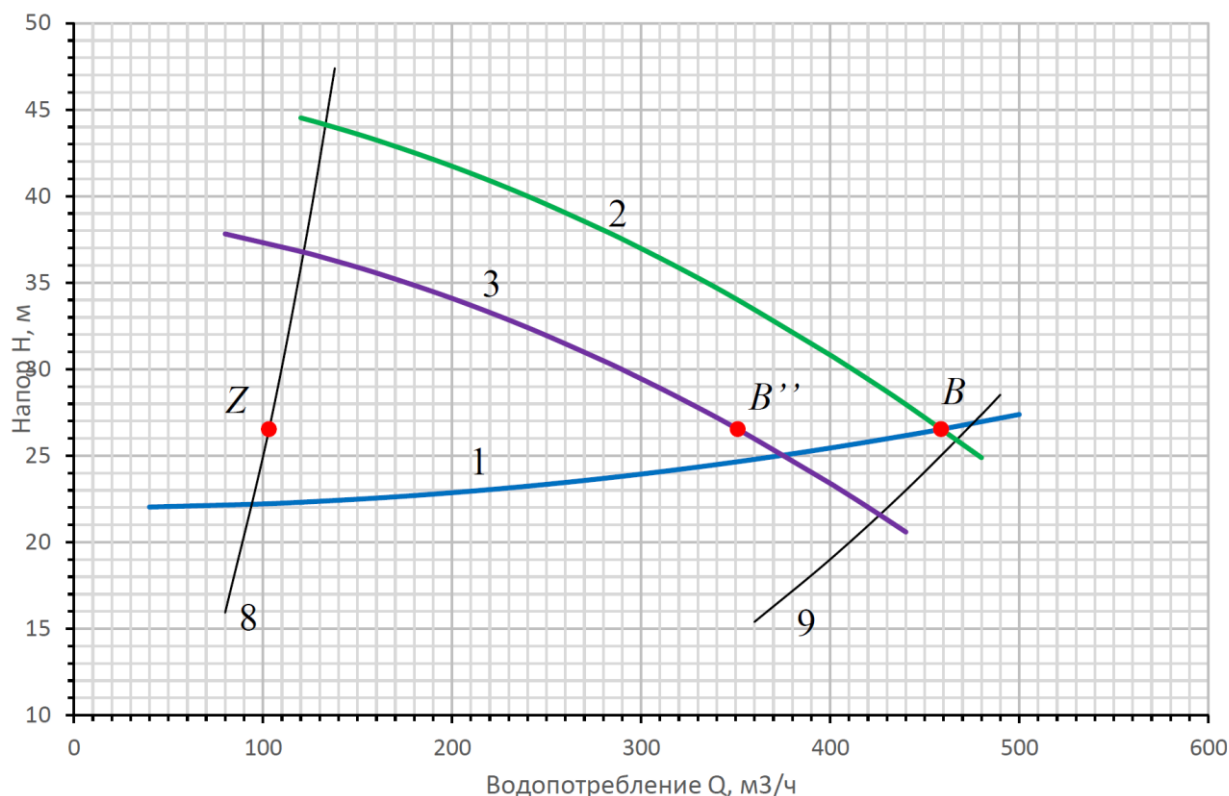
$$\tau = \frac{Q_B - Q_{B''}}{Q_Z} = \frac{458,7 - 351,1}{103,5} = 1,04 > 1,$$

где Q_B – номинальная подача регулируемого насоса в систему распределения воды (рисунок 2);

$Q_{B''}$ – подача нерегулируемого насоса при напоре H_B ;

Q_Z – подача насоса на границе рабочей области при напоре H_B .

Как следует из выполненного расчета и построений на рисунке 2, условие требуемой степени разнотипности выполняется, работа регулируемого насоса во всем диапазоне регулирования обеспечивается в пределах рабочей зоны, определенной заводом-изготовителем.



1 – характеристика Q - H системы распределения воды; 2 – характеристика Q - H регулируемого насоса Д125-400В с ЧРЭП; 3 – характеристика Q - H нерегулируемого насоса Д125-400В-а; 8 – левая граница рабочей зоны насосов; 9 – правая граница рабочей зоны насосов; Z – режимная точка на левой границе рабочей зоны при напоре H_B ; B – рабочая точка работы одного регулируемого насоса Д125-400В при номинальной частоте вращения рабочего колеса; B' – рабочая точка работы нерегулируемого насоса Д125-400В-а при напоре H_B

Рисунок 2. – Определение степени разнотипности подобранных насосов

Аналитические характеристики Q - H и Q - η насосов определяются путем аппроксимации соответствующих графических паспортных характеристик рассматриваемого насоса. Съем точек с графической диаграммы можно производить вручную или при помощи программы «GetData Graph Digitizer». Аппроксимацию рекомендуется производить по методу наименьших квадратов полиномом третьей степени [3]. Найденные коэффициенты аппроксимации приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Коэффициенты аппроксимации характеристик Q - H и Q - η центробежных насосов

Д125-400В				Д125-400В-а			
a_0	47,0429805	b_0	36,25	a_0	39,1857482	b_0	36,25
a_1	-0,01255362	b_1	0,29640845	a_1	-0,01145739	b_1	0,32476852
a_2	-0,00007	b_2	-0,0004722	a_2	-0,00007	b_2	-0,0005669

Расчет переходных режимов работы насосного оборудования. Под переходными режимами в данном контексте подразумеваются режимы смены количества работающих насосов. Для их определения необходимо найти общие решения (точки пересечения) для пары характеристик:

– для одного насоса:

$$\begin{cases} H_B = H_{\Gamma} + S \cdot Q_B^2 \\ H_B = a_0 + a_1 \cdot Q_B + a_2 \cdot Q_B^2 \end{cases}; \quad (4)$$

– для m однотипных насосов, работающих параллельно:

$$\begin{cases} H_X = H_{\Gamma} + S \cdot Q_X^2 \\ H_X = a_0 + a_1 \cdot \frac{1}{m} \cdot Q_X + a_2 \cdot \frac{1}{m^2} \cdot Q_X^2 \end{cases}, \quad (5)$$

где $j = m$ – номер переходной точки, соответствующий количеству работающих насосов;

– для двух разнотипных насосов 1 и 2, работающих параллельно:

$$\begin{cases} H_C = H_T + S \cdot Q_C^2 \\ Q_C = Q_1(H_C) + Q_2(H_C) \end{cases}, \quad (6)$$

где

$$Q_j(H_C) = -\frac{\sqrt{a_{1j}^2 - 4 \cdot a_{2j} \cdot (a_{0j} - H_C)} + a_{1j}}{2 \cdot a_{2j}}, \quad (7)$$

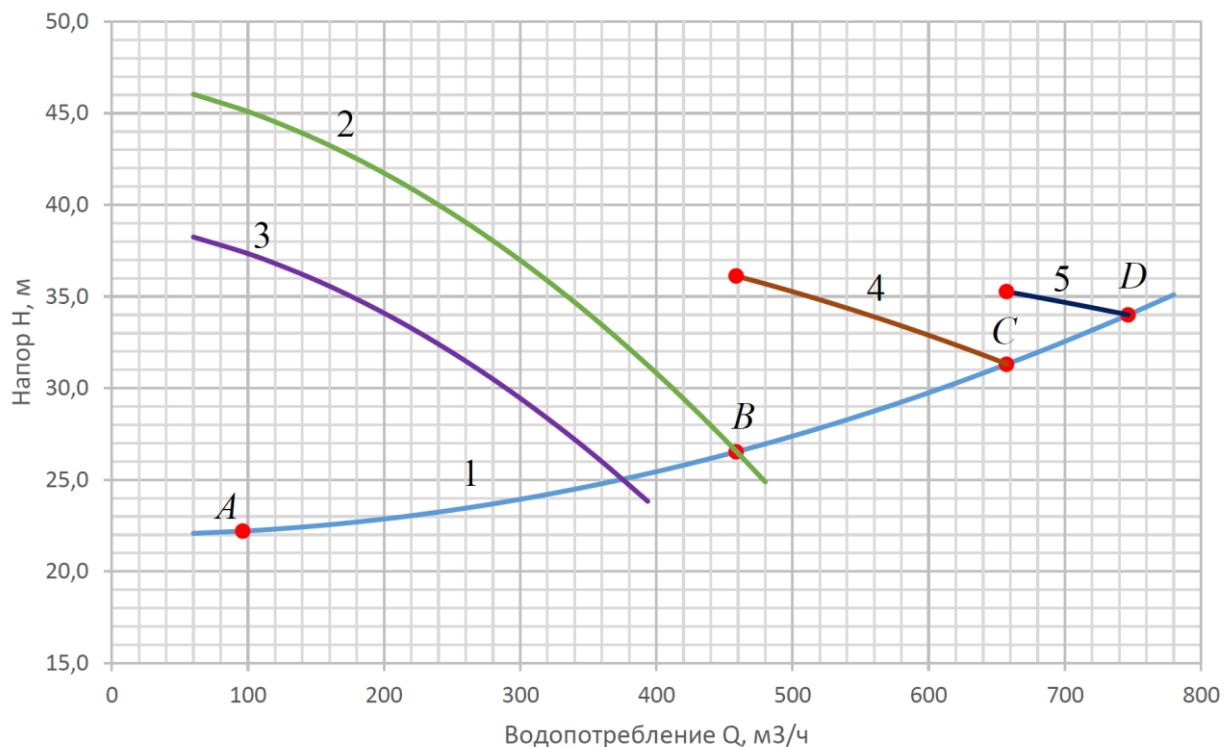
a_j – порядковый номер насоса.

Переходные режимы делят диапазон водопотребления Q_{\min} – Q_{\max} на расчетные участки (таблица 4 и рисунок 3), в пределах которых работает свой набор насосов. Подразумевается, что первый участок обеспечивает регулируемый насос, далее на втором к нему подключается второй нерегулируемый, на третьем – еще один и так далее до достижения Q_{\max} .

На участке A – B водопотребление обеспечивает один регулируемый насос путем изменения частоты вращения рабочего колеса, на участке B – C водопотребление поддерживается за счет работы регулируемого насоса параллельно с нерегулируемым, на участке C – D водопотребление поддерживается за счет работы регулируемого насоса параллельно с двумя нерегулируемыми.

Таблица 4. – Результаты расчета переходных режимов

Расчетный режим	Точка на графике	Q , м ³ /ч	H , м
Q_{\min}	A	93,6	22,2
Q_B	B	458,7	26,5
Q_C	C	657,3	31,3
Q_{\max}	D	746,6	34,0



1 – характеристика Q - H системы распределения воды; 2 – характеристика Q - H регулируемого насоса Д125-400В с ЧРЭП; 3 – характеристика Q - H нерегулируемого насоса Д125-400В-а; 4 – суммарная характеристика Q - H параллельной работы регулируемого (при номинальной частоте вращения рабочего колеса) и нерегулируемого насосов; 5 – суммарная характеристика Q - H параллельной работы регулируемого (при номинальной частоте вращения рабочего колеса) и двух нерегулируемых насосов; A – минимальное расчетное водопотребление Q_{\min} ; B – рабочая точка работы одного регулируемого насоса Д125-400В при номинальной частоте вращения рабочего колеса; C – рабочая точка работы регулируемого насоса Д125-400В при номинальной частоте вращения рабочего колеса параллельно с одним нерегулируемым насосом Д125-400В-а; D – максимальное расчетное водопотребление Q_{\max}

Рисунок 3. – Расчетные режимы работы насосного оборудования

Расчет режимных характеристик насосного оборудования. Для определения производительности, КПД и потребляемой мощности каждого насоса в отдельности при их параллельной работе в группе необходимо рассчитать их режимные характеристики (рисунок 4). Последовательность действий следующая:

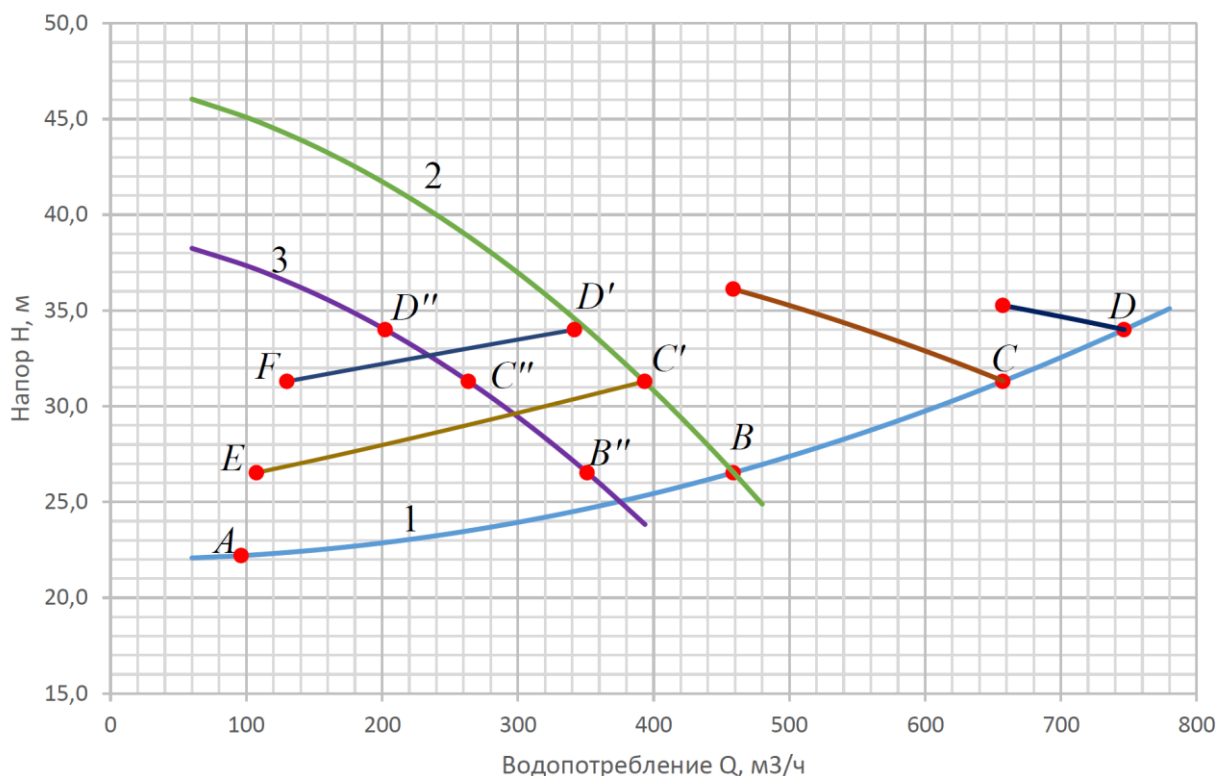
а) при работе одного регулируемого насоса в диапазоне от Q_{\min} до Q_B его режимная характеристика совпадает с характеристикой сети (1) и определяется выражением (1) на участке $A-B$;

б) при параллельной работе регулируемого насоса с нерегулируемым в диапазоне водопотребления от Q_B до Q_C каждый из насосов имеет свою режимную характеристику. Зная значение водопотребления Q_i , требуемое для его обеспечения, напор H_i (1) находим режимную характеристику нерегулируемого насоса; режимная характеристика регулируемого при этом находится из выражения (8):

$$Q_p = Q_i - Q_H ; \tag{8}$$

в) при параллельной работе регулируемого насоса с двумя нерегулируемыми в диапазоне водопотребления от Q_C до Q_D режимная характеристика одного нерегулируемого насоса определяется уравнением:

$$Q_p = Q_i - 2 \cdot Q_H . \tag{9}$$



1 – характеристика $Q-H$ системы распределения воды; 2 – характеристика $Q-H$ регулируемого насоса Д125-400В с ЧРЭП; 3 – характеристика $Q-H$ нерегулируемого насоса Д125-400В-а; А – минимальное расчетное водопотребление Q_{\min} ; В – рабочая точка работы одного регулируемого насоса Д125-400В при номинальной частоте вращения рабочего колеса; С – рабочая точка работы регулируемого насоса Д125-400В при номинальной частоте вращения рабочего колеса параллельно с одним нерегулируемым насосом Д125-400В-а; D – максимальное расчетное водопотребление Q_{\max} ; А-В – режимная характеристика одиночного регулируемого насоса; E-C' – режимная характеристика регулируемого насоса при параллельной работе с нерегулируемым на участке водопотребления B-C; F-D' – режимная характеристика регулируемого насоса при параллельной работе с двумя нерегулируемыми насосами на участке водопотребления C-D; C''-B'' – режимная характеристика нерегулируемого насоса при параллельной работе с регулируемым насосом на участке водопотребления B-C; D''-C'' – режимная характеристика каждого из двух нерегулируемых насосов при параллельной работе с регулируемым на участке водопотребления C-D

Рисунок 4. – Режимные характеристики насосного оборудования

Результаты расчетов приведены в таблице 5.

Таблица 5. – Результаты расчета режимов работы насосной станции во всем диапазоне водопотребления

Режим	$H_{тр}$	$Q_{тр}$	$Q_{рег}$	$Q_{чрег1}$	$Q_{чрег2}$
1	2	3	4	5	6
	м	м³/ч	м³/ч	м³/ч	м³/ч
А	22,20	96,3	96,3		
	22,74	185,5	185,5		

Окончание таблицы 5

1	2	3	4	5	6
	23,28	244,1	244,1		
	23,82	291,0	291,0		
	24,36	331,4	331,4		
	24,91	367,4	367,4		
	25,45	400,2	400,2		
	25,99	430,4	430,4		
B	26,53	458,7	458,7		
	26,53	458,7	107,6	351,2	
	27,13	488,0	146,8	341,2	
	27,72	515,6	184,5	331,0	
	28,32	541,8	221,2	320,6	
	28,92	566,8	256,9	309,9	
	29,51	590,7	291,9	298,8	
	30,11	613,7	326,2	287,5	
	30,70	635,8	360,1	275,7	
C	31,30	657,3	393,63	263,6	
	31,30	657,3	130,0	263,6	263,6
	31,64	669,1	155,9	256,6	256,6
	31,98	680,7	181,9	249,4	249,4
	32,31	692,1	208,1	242,0	242,0
	32,65	703,4	234,4	234,5	234,5
	32,99	714,4	260,9	226,8	226,8
	33,33	725,3	287,6	218,9	218,9
	33,66	736,0	314,5	210,7	210,7
D	34,00	746,6	341,8	202,4	202,4

Расчет потребляемой мощности. Расчет потребляемой мощности ведется по режимным характеристикам насосов для регулируемого и нерегулируемого насоса.

Таким образом, для первого диапазона водопотребления *A–B* потребляемая мощность в произвольном режиме всей насосной станции будет определяться выражением:

$$N_i = N_p. \quad (10)$$

Для второго диапазона водопотребления *B–C*, когда параллельно работают регулируемый насос и нерегулируемый насос:

$$N_i = N_p + N_n. \quad (11)$$

Для следующего диапазона *C–D*:

$$N_i = N_p + 2 \cdot N_n. \quad (12)$$

В результате становится известна потребляемая насосной станцией мощность во всем диапазоне водопотребления от Q_{\min} до Q_{\max} . Результаты расчетов приведены в таблице 6.

Таблица 6. – Результаты расчета потребляемой мощности

Режим	$H_{гр}$	$Q_{гр}$	$\eta_{рег}$	$\eta_{рег}$	$\eta_{нрег}$	$N_{рег}$	$N_{нрег}$	$N_{нрег}$	$\sum N$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	м	м ³ /ч	д.ед	%	%	кВт	кВт	кВт	кВт	
A	22,20	96,3	0,71	63,5		9,8			9,8	
	22,74	185,5	0,75	78,5		15,7			15,7	
	23,28	244,1	0,79	81,3		20,5			20,5	
	23,82	291,0	0,83	81,0		25,0			25,0	
	24,36	331,4	0,87	79,7		29,6			29,6	
	24,91	367,4	0,90	78,0		34,3			34,3	
	25,45	400,2	0,94	76,2		39,1			39,1	
	25,99	430,4	0,97	74,5		43,9			43,9	
	B	26,53	458,7	1,00	72,8		47,9			47,9
		26,53	458,7	0,78	65,2	80,39	12,8	33,2		46,0

Окончание таблицы 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	27,13	488,0	0,80	72,6	81,06	16,0	32,7		48,8
	27,72	515,6	0,83	77,4	81,64	19,3	32,2		51,6
	28,32	541,8	0,85	80,3	82,10	22,8	31,7		54,5
	28,92	566,8	0,88	81,7	82,45	26,6	31,1		57,7
	29,51	590,7	0,91	82,1	82,68	30,7	30,6		61,3
	30,11	613,7	0,94	81,8	82,76	35,1	30,0		65,1
	30,70	635,8	0,97	81,0	82,70	39,9	29,3		69,3
C	31,30	657,3	1,00	79,8	82,47	44,3	28,7		73,0
	31,30	657,3	0,85	68,8	82,47	17,3	28,7	28,7	74,7
	31,64	669,1	0,86	73,0	82,26	19,8	28,3	28,3	76,3
	31,98	680,7	0,88	76,3	81,98	22,3	27,9	27,9	78,1
	32,31	692,1	0,90	78,8	81,64	25,0	27,5	27,5	79,9
	32,65	703,4	0,91	80,6	81,23	27,8	27,0	27,0	81,8
	32,99	714,4	0,93	81,8	80,74	30,8	26,6	26,6	83,9
	33,33	725,3	0,95	82,4	80,17	34,0	26,1	26,1	86,2
	33,66	736,0	0,97	82,5	79,51	37,5	25,6	25,6	88,7
D	34,00	746,6	0,99	82,3	78,76	40,5	25,0	25,0	90,6

Расчет индекса экологичной эксплуатации. Расчет средневзвешенного отклонения потребляемой насосом энергии от оптимального значения (индекс удельного перерасхода энергии) ΔE производится при помощи выражения для каждого насоса в пределах режимной характеристики во всем диапазоне водопотребления от Q_{\min} до Q_{\max} . Результат расчета приведен в таблице 7.

Таблица 7. – Оценка экологичности эксплуатации насосного оборудования

Режим	$H_{гр}$ м	$Q_{гр}$ м ³ /ч	$\Delta E_{рег}$	$\Delta E_{нрег}$	$\Delta E_{нрег2}$	$\Sigma \Delta E$	
A	22,20	96,3	0,28			0,28	
	22,74	185,5	0,06			0,06	
	23,28	244,1	0,05			0,05	
	23,82	291,0	0,08			0,08	
	24,36	331,4	0,12			0,12	
	24,91	367,4	0,17			0,17	
	25,45	400,2	0,22			0,22	
	25,99	430,4	0,28			0,28	
	B	26,53	458,7	0,31			0,31
		26,53	458,7	0,49	0,04		0,16
27,13		488,0	0,37	0,02		0,14	
27,72		515,6	0,31	0,01		0,12	
28,32		541,8	0,29	0,01		0,13	
28,92		566,8	0,30	0,02		0,15	
29,51		590,7	0,32	0,04		0,18	
30,11		613,7	0,35	0,06		0,22	
30,70		635,8	0,39	0,08		0,26	
C		31,30	657,3	0,41	0,11		0,29
	31,30	657,3	0,67	0,11	0,11	0,24	
	31,64	669,1	0,59	0,12	0,12	0,24	
	31,98	680,7	0,54	0,14	0,14	0,25	
	32,31	692,1	0,50	0,15	0,15	0,26	
	32,65	703,4	0,48	0,17	0,17	0,28	
	32,99	714,4	0,48	0,19	0,19	0,30	
	33,33	725,3	0,48	0,21	0,21	0,32	
	33,66	736,0	0,50	0,23	0,23	0,34	
	D	34,00	746,6	0,48	0,26	0,26	0,36
Сумма по НС:						5,81	

Из таблицы 7 видно, что область минимальных значений индекса ΔE совпадает с областью наиболее вероятного значения водопотребления $Q_{пт}$, что свидетельствует основным положениям ГОСТ 33969-2016⁵ о высокой энергоэффективности выбранных режимов работы подобранного насосного оборудования. Графически результаты расчета представлены на рисунке 5.

⁵ URL: <https://tnpa.by/#!/DocumentCard/362384/530403>.

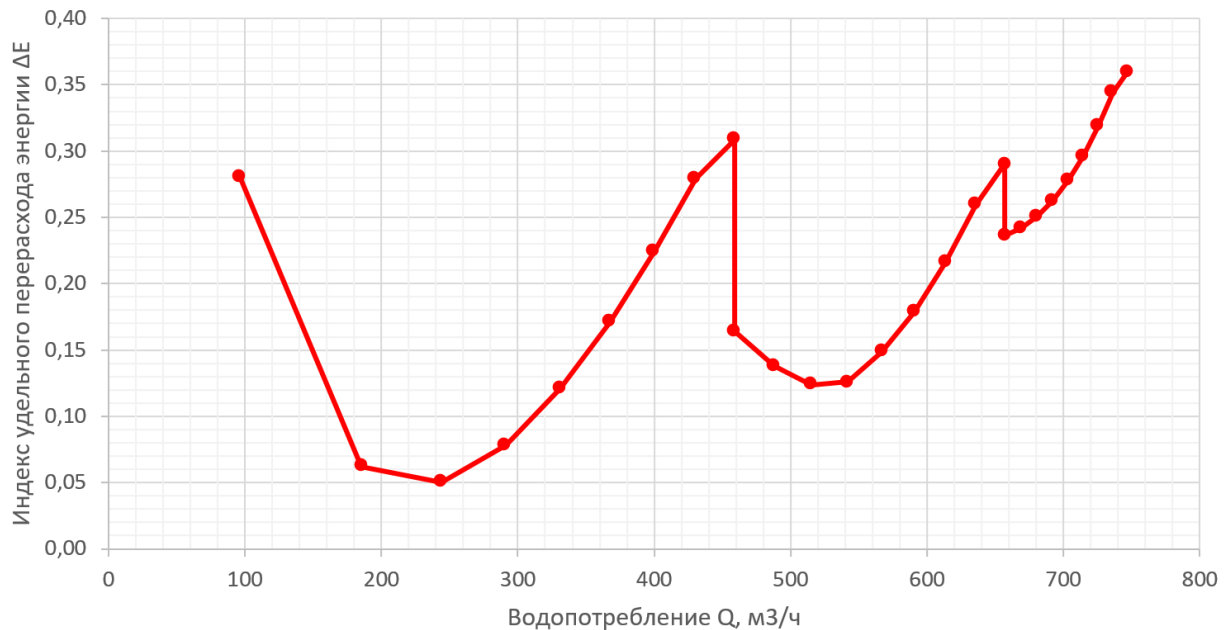


Рисунок 5. – Индекс удельного перерасхода энергии при использовании ЧРЭП

Расчет энергопотребления за расчетный период. Зная зависимость мгновенной потребляемой мощности от водопотребления и зависимость обеспеченности водопотребления (см. выше), находим обеспеченность мгновенной потребляемой мощности N_i :

$$p_i = f(N_i). \quad (13)$$

Объем электроэнергии, затраченной насосной станцией на транспортирование воды потребителю за расчетный период, в таком случае будет определяться интегралом функции (13). Интегрируя уравнение (3) в пределах от Q_{\min} до Q_{\max} , получим объем водопотребления за расчетный период ΣV . Результаты расчетов представлены в таблице 8.

Удельное энергопотребление в данном случае определяется из выражения:

$$w_{\text{уд}} = \frac{W_{\text{рег}}}{\Sigma V} = \frac{263613,6}{2779524} = 0,095 \text{ кВт/м}^3.$$

Таблица 8. – Расчет потребляемой энергии за расчетный период

Режим	$H_{\text{тр}}$	$Q_{\text{тр}}$	ΣN	p_i	$W_{\text{рег}}$	ΣV
1	2	3	4	5	6	7
	м	м ³ /ч	кВт	ч	кВт·ч	м ³
A	22,20	96,3	9,8	8467,96		
	22,74	185,5	15,7	7285,14	15119,92	166670,73
	23,28	244,1	20,5	5980,98	23589,77	280114,94
	23,82	291,0	25,0	4841,04	25928,81	304986,78
	24,36	331,4	29,6	3879,56	26290,42	299247,27
	24,91	367,4	34,3	3079,99	25576,78	279388,89
	25,45	400,2	39,1	2421,49	24173,09	252723,50
	25,99	430,4	43,9	1884,25	22304,85	223119,56
	26,53	458,7	47,9	1450,50	19918,69	192836,73
	26,53	458,7	46,0	1450,50	0,00	0,00
B	27,13	488,0	48,8	1073,84	17852,05	178293,24
	27,72	515,6	51,6	785,53	14462,25	144665,87
	28,32	541,8	54,5	569,67	11449,27	114119,42
	28,92	566,8	57,7	412,32	8831,91	87207,89
	29,51	590,7	61,3	301,24	6609,58	64289,05
	30,11	613,7	65,1	225,53	4782,89	45589,55
	30,70	635,8	69,3	175,52	3360,58	31246,19
	31,30	657,3	73,0	142,52	2346,73	21332,95
C	31,30	657,3	74,7	142,52	0,00	0,00
	31,64	669,1	76,3	128,39	1066,61	9367,73
	31,98	680,7	78,1	115,90	964,62	8432,20
	32,31	692,1	79,9	103,80	955,32	8303,86
	32,65	703,4	81,8	90,93	1040,40	8979,75
	32,99	714,4	83,9	76,18	1222,11	10455,94

Окончание таблицы 8

1	2	3	4	5	6	7
	33,33	725,3	86,2	58,50	1503,63	12727,65
	33,66	736,0	88,7	36,89	1889,34	15789,41
<i>D</i>	34,00	746,6	90,6	10,41	2373,97	19635,20
					263 613,58	2 779 524

Оценка экологического эффекта. Пересчет затрат электроэнергии на потребления условного топлива за расчетный период T :

$$G_{\text{тут}} = W_{\text{рег}} \cdot q_{\text{тут}} = 263613,6 \cdot \frac{238,5}{10^6} = 62,87 \text{ тут/год},$$

где $q_{\text{тут}}$ – удельный расход условного топлива в г/кВт·ч на отпуск электроэнергии по энергосистеме в целом по данным Национального статистического комитета Республики Беларусь и ГПО «Белэнерго»⁶.

Количество выброшенных парниковых газов при генерации энергии, затраченной насосной станцией на транспортирование воды за расчетный период T в CO_2 -эквиваленте:

$$G_{\text{CO}_2} = W_{\text{рег}} \cdot q_{\text{CO}_2} = 263613,6 \cdot \frac{340,6}{10^6} = 89,78 \text{ тCO}_2/\text{год},$$

где q_{CO_2} – удельное значение выбросов парниковых газов в CO_2 -эквиваленте на генерацию 1 кВт·ч электроэнергии в г. CO_2 -экв/кВт·ч по данным [10] и Национального статистического комитета Республики Беларусь и ГПО «Белэнерго»⁷.

Расчет и анализ режимов работы насосной станции при регулировании дросселированием. Пользуясь тем же порядком рассуждений, что был применен ранее, произведем расчет режимов работы насосной станции при использовании дросселирования в качестве способа регулирования режимов работы насосного оборудования. Последовательность работы насосного оборудования принимается следующая: участок $A-B$ – водопотребление обеспечивает один насос Д125-400В, участок $B-C$ – водопотребление обеспечивается за счет параллельной работы двух насосов Д125-400В и Д125-400В-а, участок $C-D$ – водопотребление поддерживается за счет параллельной работы одного насоса Д125-400В и двух насосов Д125-400В-а (рисунок 6). Режимные характеристики определяются в ходе следующих рассуждений:

а) при работе одного насоса Д125-400В в диапазоне от Q_{\min} до Q_B его режимная характеристика определяется $Q-H$ характеристикой насоса (см. таблицу 3) на участке $E-B$;

б) при параллельной работе двух насосов – одного Д125-400В и одного Д125-400В-а в диапазоне водопотребления от Q_B до Q_C режимные характеристики каждого насоса будут – $F'-C'$ для насоса Д125-400В и $F''-C''$ для насоса Д125-400В-а. Суммарная характеристика работы насосов будет $F-C$;

в) при параллельной работе трех насосов – одного Д125-400В и двух Д125-400В-а с двумя нерегулируемыми насосами в диапазоне водопотребления от Q_C до Q_D режимные характеристики каждого насоса будут – $G'-D'$ для насоса Д125-400В и $G''-D''$ для насосов Д125-400В-а. Суммарная характеристика работы насосов будет $G-D$.

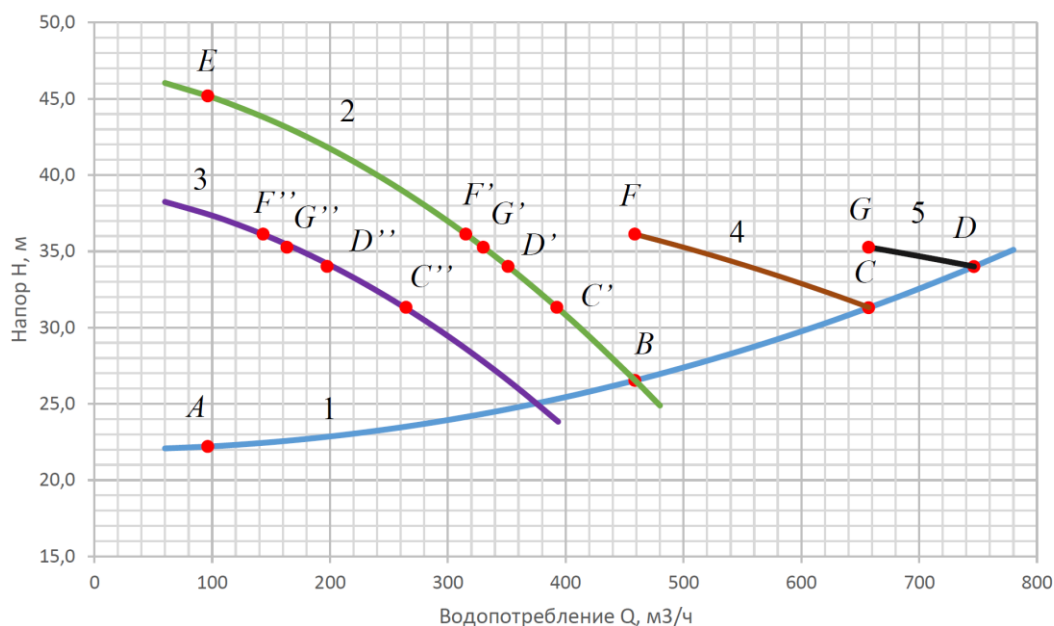


Рисунок 6. – Режимы работы насосной станции при дросселировании

⁶ URL: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/publications/izdania/public_compilation/index_39984/.

⁷ См. сноску 6.

Результаты расчетов режимов работы насосного оборудования, потребляемой мощности, экологичности эксплуатации и потребляемой энергии за расчетный период приведены в таблицах 9, 10, 11 и 12 соответственно.

Пересчет затрат электроэнергии на потребления условного топлива за расчетный период T при использовании дросселирования производим, используя выражение:

$$G'_{\text{тут}} = W_{\text{д}} \cdot q_{\text{тут}} = 35440,83 \cdot \frac{238,5}{10^6} = 84,53 \text{ тут/год.}$$

Количество выброшенных парниковых газов при генерации энергии, затраченной насосной станцией на транспортирование воды за расчетный период T в CO_2 -эквиваленте, рассчитываем, используя выражение:

$$G'_{\text{CO}_2} = W_{\text{д}} \cdot q_{\text{CO}_2} = 354403,83 \cdot \frac{340,6}{10^6} = 120,71 \text{ тCO}_2/\text{год.}$$

Таблица 9. – Результаты расчета режимов работы насосной станции во всем диапазоне водопотребления

Режим	$H_{\text{тр}}$ м	$Q_{\text{тр}}$ м ³ /ч	$H_{\text{нас}}$ м	$Q_{\text{н1}}$ м ³ /ч	$Q_{\text{н2}}$ м ³ /ч	
А	22,20	96,3	45,18	96,3		
	22,74	185,5	42,30	185,5		
	23,28	244,1	39,81	244,1		
	23,82	291,0	37,46	291,0		
	24,36	331,4	35,19	331,4		
	24,91	367,4	32,98	367,4		
	25,45	400,2	30,81	400,2		
	25,99	430,4	28,67	430,4		
	В	26,53	458,7	26,55	458,7	
		26,53	458,7	36,12	315,4	143,3
27,13		488,0	35,52	325,8	162,2	
27,72		515,6	34,93	335,9	179,6	
28,32		541,8	34,33	345,9	195,9	
28,92		566,8	33,73	355,6	211,1	
29,51		590,7	33,13	365,1	225,6	
30,11		613,7	32,53	374,5	239,2	
30,70		635,8	31,93	383,6	252,2	
С		31,30	657,3	31,33	392,6	264,7
	31,30	657,3	35,27	330,2	163,5	
	31,64	669,1	35,11	332,9	168,1	
	31,98	680,7	34,95	335,6	172,6	
	32,31	692,1	34,79	338,2	177,0	
	32,65	703,4	34,63	340,8	181,3	
	32,99	714,4	34,47	343,4	185,5	
	33,33	725,3	34,32	346,0	189,6	
	33,66	736,0	34,16	348,6	193,7	
	Д	34,00	746,6	34,00	351,2	197,7

Таблица 10. – Результаты расчетов потребляемой мощности при дросселировании

Режим	$H_{\text{тр}}$	$Q_{\text{тр}}$	$\eta_{\text{н1}}$	$\eta_{\text{н2}}$	$N_{\text{н1}}$	$N_{\text{н2}}$	$\sum N$	
1	2	3	4	5	6	7	8	
	м	м ³ /ч	%	%	кВт	кВт	кВт	
А	22,20	96,3	60,4		20,6		20,6	
	22,74	185,5	75,0		30,0		30,0	
	23,28	244,1	80,5		34,6		34,6	
	23,82	291,0	82,5		37,9		37,9	
	24,36	331,4	82,6		40,5		40,5	
	24,91	367,4	81,4		42,7		42,7	
	25,45	400,2	79,2		44,6		44,6	
	25,99	430,4	76,3		46,3		46,3	
	В	26,53	458,7	72,9		47,9		47,9
		26,53	458,7	82,8	71,2	39,5	20,9	60,3

Окончание таблицы 10

1	2	3	4	5	6	7	8
	27,13	488,0	82,7	74,0	40,1	22,3	62,4
	27,72	515,6	82,5	76,3	40,8	23,6	64,3
	28,32	541,8	82,3	78,1	41,4	24,7	66,0
	28,92	566,8	81,9	79,5	42,0	25,7	67,6
	29,51	590,7	81,5	80,7	42,5	26,6	69,1
	30,11	613,7	81,0	81,5	43,1	27,4	70,5
	30,70	635,8	80,5	82,1	43,6	28,1	71,8
C	31,30	657,3	79,8	82,5	44,2	28,8	73,0
	31,30	657,3	82,6	74,2	40,4	44,6	85,0
	31,64	669,1	82,6	74,8	40,6	45,2	85,8
	31,98	680,7	82,5	75,4	40,7	45,9	86,6
	32,31	692,1	82,5	76,0	40,9	46,5	87,4
	32,65	703,4	82,4	76,5	41,1	47,1	88,1
	32,99	714,4	82,3	77,0	41,2	47,6	88,8
	33,33	725,3	82,3	77,4	41,4	48,2	89,5
	33,66	736,0	82,2	77,9	41,5	48,7	90,2
D	34,00	746,6	82,1	78,3	41,7	49,2	90,9

Таблица 11. – Оценка экологичности эксплуатации насосного оборудования при дросселировании

Режим	$H_{тр}$ м	$Q_{тр}$ м ³ /ч	$\Delta E_{1н}$	$\Delta E_{2н}$	$\Sigma \Delta E'$
A	22,20	96,3	0,756		0,76
	22,74	185,5	0,325		0,32
	23,28	244,1	0,162		0,16
	23,82	291,0	0,066		0,07
	24,36	331,4	0,000		0,00
	24,91	367,4	0,049		0,05
	25,45	400,2	0,087		0,09
	25,99	430,4	0,118		0,12
B	26,53	458,7	0,144		0,14
	26,53	458,7	0,025	0,479	0,35
	27,13	488,0	0,009	0,399	0,29
	27,72	515,6	0,006	0,334	0,25
	28,32	541,8	0,020	0,281	0,22
	28,92	566,8	0,033	0,236	0,20
	29,51	590,7	0,046	0,197	0,18
	30,11	613,7	0,057	0,163	0,16
	30,70	635,8	0,068	0,133	0,15
	31,30	657,3	0,078	0,107	0,13
C	31,30	657,3	0,002	0,385	0,41
	31,64	669,1	0,002	0,367	0,39
	31,98	680,7	0,006	0,351	0,37
	32,31	692,1	0,009	0,335	0,36
	32,65	703,4	0,013	0,319	0,35
	32,99	714,4	0,017	0,305	0,33
	33,33	725,3	0,020	0,291	0,32
	33,66	736,0	0,024	0,278	0,31
D	34,00	746,6	0,027	0,266	0,30
					6,8

Таблица 12. – Расчет потребляемой энергии за расчетный период при дросселировании

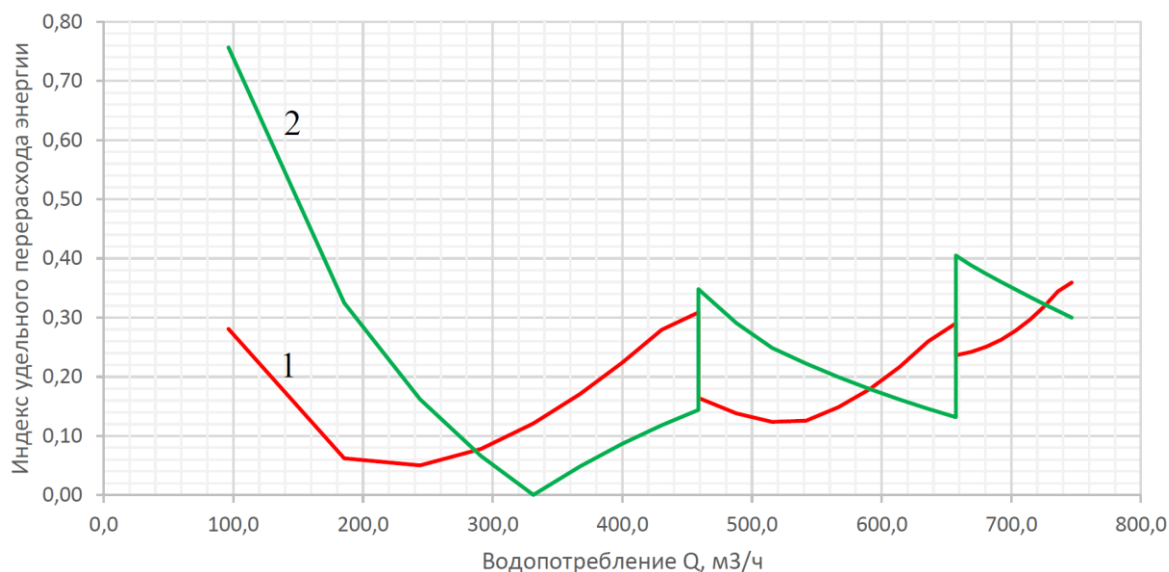
Режим	$H_{тр}$	$Q_{тр}$	ΣN	p_i	W_d
1	2	3	4	5	6
	м	м ³ /ч	кВт	ч	кВт·ч
A	22,20	96,3	20,6	8467,96	
	22,74	185,5	30,0	7285,14	29954,89
	23,28	244,1	34,6	5980,98	42135,82

Окончание таблицы 12

1	2	3	4	5	6
	23,82	291,0	37,9	4841,04	41316,66
	24,36	331,4	40,5	3879,56	37664,60
	24,91	367,4	42,7	3079,99	33239,51
	25,45	400,2	44,6	2421,49	28733,98
	25,99	430,4	46,3	1884,25	24428,49
B	26,53	458,7	47,9	1450,50	20445,17
	26,53	458,7	60,3	1450,50	0,00
	27,13	488,0	62,4	1073,84	23118,25
	27,72	515,6	64,3	785,53	18272,90
	28,32	541,8	66,0	569,67	14070,63
	28,92	566,8	67,6	412,32	10515,48
	29,51	590,7	69,1	301,24	7593,55
	30,11	613,7	70,5	225,53	5282,49
	30,70	635,8	71,8	175,52	3556,24
C	31,30	657,3	73,0	142,52	2387,56
	31,30	657,3	85,0	142,52	0,00
	31,64	669,1	85,8	128,39	1205,90
	31,98	680,7	86,6	115,90	1076,77
	32,31	692,1	87,4	103,80	1052,11
	32,65	703,4	88,1	90,93	1129,10
	32,99	714,4	88,8	76,18	1304,97
	33,33	725,3	89,5	58,50	1577,02
	33,66	736,0	90,2	36,89	1942,59
D	34,00	746,6	90,9	10,41	2399,13
					354 403,83

Сравнение результатов расчета режимов работы насосного оборудования при частотном регулировании и дросселировании. Проанализируем результаты расчетов режимов работы насосного оборудования при регулировании с использованием ЧРЭП и при дросселировании.

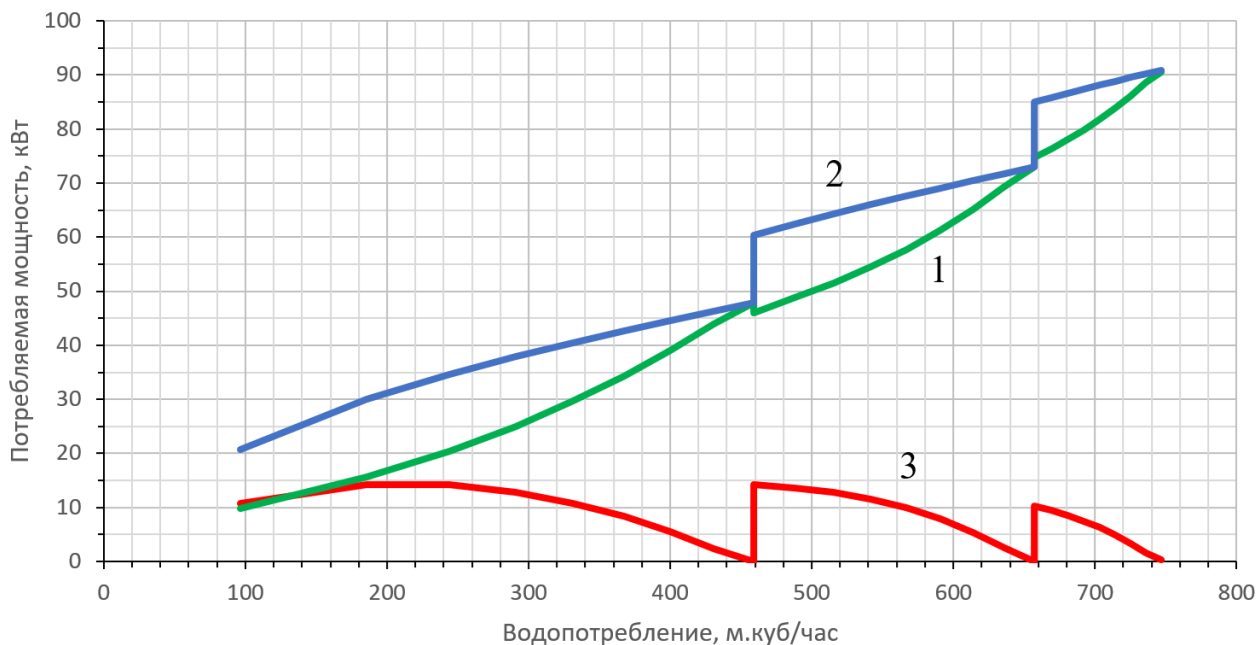
На рисунке 7 приведены кривые индекса перерасхода энергии для двух рассмотренных способов регулирования. В ряде режимов наблюдается более экологичная эксплуатация насосного оборудования при дросселировании, чем при использовании ЧРЭП. Это возможно объяснить наличием дополнительных потерь энергии в электроприводе ($\approx 2\%$), а также изменением КПД насоса при снижении частоты вращения рабочего колеса. Но в целом, по суммарному показателю режимы работы насосного оборудования более экологичны при частотном регулировании, нежели при дросселировании.



1 – кривая индекса ΔE варианта с частотным регулированием; 2 – кривая индекса ΔE варианта с дросселированием

Рисунок 7. – Индекс удельного перерасхода энергии при использовании ЧРЭП

На рисунке 8 приведено сравнение мгновенной потребляемой мощности насосной станцией при частотном регулировании, при дросселировании и их разнице. Очевидно, что при частотном регулировании мгновенная потребляемая мощность ниже во всех рассматриваемых режимах за исключением переходных режимов *B*, *C* и *D*, в которых энергопотребление насосного оборудования сравнивается в обоих вариантах.



1 – график потребляемой мощности при частотном регулировании; 2 – график потребляемой мощности при дросселировании; 3 – результирующая разница потребляемой мощности при дросселировании и частотном регулировании

Рисунок 8. – Сравнение мгновенной потребляемой мощности насосной станцией при частотном регулировании и при дросселировании

Величина экономии потребляемой электроэнергии при частотном регулировании определяется:

$$\Delta W = W_{\text{д}} - W_{\text{рег}} = 354403,83 - 263613,58 = 90790,25 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год.}$$

Сравнив полученные значения потребления условного топлива при использовании ЧРЭП и дросселирования, оцениваем экологический эффект по уровню снижения потребления условного топлива:

$$\Delta G_{\text{ТУТ}} = G'_{\text{ТУТ}} - G_{\text{ТУТ}} = 84,53 - 62,87 = 21,66 \text{ туг/год}$$

и выброса парниковых газов в CO_2 -эквиваленте:

$$\Delta G_{\text{CO}_2} = G'_{\text{CO}_2} - G_{\text{CO}_2} = 120,71 - 89,87 = 30,84 \text{ тCO}_2/\text{год}.$$

Таким образом, снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду составит на 21,66 туг/год и 89,87 т CO_2 -экв меньше при использовании ЧРЭП для регулирования режимов работы рассматриваемой насосной станции по сравнению с использованием для тех же целей дросселирования.

Расчет потребляемой энергии насосной станцией за расчетный период при помощи альтернативных методов. Сравнение результатов. Для сравнительного анализа разработанной методики расчета режимов работы насосного оборудования и энергопотребления за расчетный период произведем сравнительный расчет по альтернативной методике Б.С. Лезнова [6].

Определим энергозатраты за расчетный период при использовании частотного регулирования режимов работы:

$$W_{\text{рег}} = \frac{N_{\text{б}} \cdot T \cdot (1 + \lambda)}{\eta_{\text{эд}} \cdot 4} \cdot \left[(1 + H_{\text{п}}^*) + \lambda^2 \cdot (1 - H_{\text{п}}^*) \right] =$$

$$= \frac{85,4 \cdot 8760 \cdot (1 + 0,129)}{0,95 \cdot 4} \cdot \left[(1 + 0,647) + 0,129^2 \cdot (1 - 0,647) \right] = 275533,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}$$

и при использовании дросселирования:

$$W_d = \frac{N_6 \cdot T \cdot (1 + \lambda)}{\eta_{эд} \cdot 4} \cdot \left[(1 + H_{\Phi}^*) + \lambda^2 \cdot (1 - H_{\Phi}^*) \right] =$$

$$= \frac{85,4 \cdot 8760 \cdot (1 + 0,129)}{0,95 \cdot 4} \cdot \left[(1 + 1,15) + 0,129^2 \cdot (1 - 1,15) \right] = 358388,1 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год.}$$

Экономия энергии составит соответственно:

$$\Delta W = W_d - W_{пер} = 358388,1 - 275533,5 = 82855,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год.}$$

Можно рассчитать напрямую экономию электроэнергии за расчетный период при внедрении регулируемого привода:

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

$$= \frac{1}{0,95} \cdot 85,4 \cdot 8760 \cdot \left[0,18 - (1 + 0,02 - 0,98) \right] \cdot 0,75 = 826383,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год.}$$

Разница в результатах составляет 0,2%.

Следует отметить, что методика, предложенная Б.С. Лезновым, не позволяет проанализировать и оценить влияние на энергопотребление изменения порядка включения/выключения насосов, оборудования ЧРЭП всех или нескольких насосных агрегатов.

Сравнение результатов расчета по разработанной методике и методике, предложенной Б.С. Лезновым, приведены в таблице 13.

Таблица 13. – Сравнение результатов расчета

Показатель	Ед. изм.	Результаты расчета		
		по разработанной методике	по Б.С. Лезнову	
			по разнице энергозатрат W_d и $W_{пер}$	прямой расчет экономии $W_{рез}$
Расчетное энергопотребление до внедрения ЧРЭП	кВт·ч/год	354403,8	358388,1	–
Расчетное энергопотребление после внедрения ЧРЭП		263613,6	275533,5	–
Расчетная экономия энергоресурсов		90790,2	82855,5	82683,4
Фактическое энергопотребление до внедрения ЧРЭП		357154,6		
Фактическое энергопотребление после внедрения ЧРЭП		267286,8		
Фактическая экономия энергоресурсов		89867,8		
Расхождение расчетных значений с фактическими		%	1,01	8,7

Заключение. Можно сделать следующие выводы:

1. В данной статье на конкретных примерах рассмотрен предложенный авторами подход к подбору насосного оборудования с ЧРЭП, позволяющий обеспечить работу насосов в зоне высоких КПД в течение максимально продолжительного времени при достаточной степени их разнотипности.

2. Описан процесс анализа режимов работы центробежных насосов с ЧРЭП и без во всем диапазоне водопотребления от Q_{\min} до Q_{\max} .

3. Произведен сравнительный анализ режимов работы насосных станций с использованием для управления производительностью насосного оборудования ЧРЭП и метода дросселирования. Показано преимущество частотного регулирования перед дросселированием за счет более оптимальных и энергоэффективных режимов работы. Произведен сравнительный расчет объемов потребляемой электроэнергии за расчетный период для насосных станций с использованием частотного регулирования и дросселирования. На конкретном примере показана разница в итоговом энергопотреблении для сравниваемых вариантов управления насосами.

4. Произведен сравнительный расчет экологических показателей для различных вариантов оснащения насосных станций. Обоснована возможность снижения степени антропогенной нагрузки на окружающую среду

в результате внедрения энергоэффективных мероприятий вследствие уменьшения потребления условного топлива и снижения объемов выбросов парниковых газов в атмосферу в пересчете на CO₂-эквивалент.

5. Произведен расчет объемов потребляемой энергии по альтернативным методикам. В результате сравнения результатов расчета показано, что применение разработанной методологии обеспечивает более высокие показатели энергетической эффективности и углеродной нейтральности при работе насосных станций, по сравнению с традиционно используемыми подходами.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Гуринович, А.Д. Системы питьевого водоснабжения с водозаборными скважинами. Планирование, проектирование, строительство и эксплуатация / А.Д. Гуринович. – Минск : Технопринт, 2001. – 305 с.
3. 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.
4. Еловик, В.Л. Методика прямого расчета потребляемой энергии частотно-регулируемым насосом за расчетный период / В.Л. Еловик, Ю.П. Седлухо // Вода: химия и экология. – 2010. – № 7. – С. 46–50.
5. Карасев, Б.В. Насосы и насосные станции : учеб. для вузов / Б.В. Карасев. – Минск : Выш. шк., 1990. – 325 с.
6. Лезнов, Б.С. Методика оценки эффективности применения регулируемого электропривода в водопроводных и канализационных насосных установках / Б.С. Лезнов. – М. : Машиностроение, 2011. – 88 с.
7. Лезнов, Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухоподводящих установках / Б.С. Лезнов. – М. : Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
8. Старинский, В.П. Технологические гидравлические и техникоэкономические расчеты в водоснабжении : учеб. пособие для вузов / В.П. Старинский. – Минск : Выш. шк., 1985. – 200 с.
9. Фисенко, В.Н. Энергетическая эффективность насосов в системах водоснабжения и водоотведения / В.Н. Фисенко // Водоснабжение и санитарная техника. – 2018. – № 6. – С. 52–63.
10. Черняховская, Ю.В. Выбросы парниковых газов в электроэнергетике и их снижение от внедрения российских проектов атомных электростанций / Ю.В. Черняховская // Вестник МЭИ. – 2017. – № 3. – С. 46–52.
11. Bortoni, E.C. Optimization of parallel variable-speed-driven centrifugal pumps operation / E.C. Bortoni, R. Alves de Almeida, A.N.C. Viana // Energy efficiency. – 2008. – № 1. – P. 167–173.

REFERENCES

1. 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.).
2. Gurinovich, A.D. (2001). *Sistemy pit'evogo vodosnabzheniya s vodozabornymi skvazhinami. Planirovanie, proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluatatsiya*. Minsk: Tekhnoprint. (In Russ.).
3. Elovik, V.L. (2019). Metodika rascheta i analiza rezhimov raboty nasosnykh agregatov, oborudovannykh reguliruемым электроприводом [Calculation and analyses methodology of the working conditions of pumping units, equipped with adjustable drive]. *Trudy BGTU. Ser. 2, Khimicheskie tekhnologii, biotekhnologii, geoekologiya* [Proceedings of BSTU. Ser. 2, Chemical technologies, biotechnologies, geocology], (2), 204–213. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Elovik, V.L. & Sedlukho, Yu.P. (2010). Metodika pryamogo rascheta potrebyaemoi energii chastotno-reguliruемым насосом за raschetnyi period [Direct calculation of energy consumption by variable-frequency drive during working period]. *Voda: khimiya i ekologiya*, (7), 46–50. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Karasev, B.V. (1990). *Nasosy i nasosnye stantsii*. Minsk: Vysh. shk. (In Russ.).
6. Leznov, B.S. (2011). *Metodika otsenki effektivnosti primeneniya reguliruемого электропривода v vodoprovodnykh i kanalizatsionnykh nasosnykh ustanovkakh*. Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.).
7. Leznov, B.S. (2006). *Energoberezhenie i reguliruemyi privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh*. Moscow: Energoatomizdat. (In Russ.).
8. Starinskii, V.P. (1985). *Tekhnologicheskie gidravlicheskie i tekhnikoekonomicheskie raschety v vodosnabzhenii*. Minsk: Vysh. shk. (In Russ.).
9. Fisenko, V.N. (2018). Energeticheskaya effektivnost' nasosov v sistemakh vodosnabzheniya i vodootvedeniya [Energy efficiency of pumps in water supply and wastewater disposal systems]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water Supply and Sanitary Technique], (6), 52–63. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Chernyakhovskaya, Yu.V. (2017). Vybrosy parnikovyykh gazov v elektroenergetike i ikh snizhenie ot vnedreniya rossiiskikh proektov atomnykh elektrostantsii. *Vestnik MEI*, (3), 46–52. (In Russ.).
11. Bortoni, E.C., Alves de Almeida, R. & Viana, A.N.C. (2008). Optimization of parallel variable-speed-driven centrifugal pumps operation. *Energy efficiency*, (1), 167–173.

Поступила 12.05.2022

**CALCULATION AND ANALYSIS OF OPERATING MODES AND ENERGY CONSUMPTION
OF CENTRIFUGAL PUMPS WITH FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE
IN WATER SUPPLY SYSTEMS**

I. VOITOV, V. YALOVIK

The article discusses examples of calculating the operating modes of a centrifugal pump of a water supply and distribution system using a newly developed methodology by the authors. The main points of calculation and analysis of technological, energy and environmental parameters characterizing the operation of centrifugal pumps of water supply and distribution systems are given.

Keywords: *energy efficiency, water supply and distribution systems, pumping unit, variable frequency drive, throttling, reference fuel, greenhouse gases, carbon neutrality.*