

УДК 628.1+628.6

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ НА НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

**Т.В. КОЗИЦИН**

*(Полоцкий государственный университет)*

*Рассмотрен вопрос определения затрат энергии насосной станцией при проектировании водопроводной сети. Показано, что рост потребности в электроэнергии напрямую связан с использованием в качестве топлива невозобновляемых природных ресурсов и ухудшением экологической обстановки, а одним из способов снижения потребления энергии является повышение точности проектных расчетов энергопотребляющих объектов.*

Рост численности населения городов, улучшение благоустройства жилых помещений приводит к увеличению потребности людей в воде для хозяйственно-питьевых нужд и для промышленных целей. Для подачи постоянно возрастающих объемов питьевой воды производится строительство новых, а также реконструкция и расширение существующих насосных станций и водопроводных сетей. Рост водопотребления связан также с необходимостью увеличения производства электроэнергии. Это, в свою очередь, требует все большего потребления в качестве топлива на электростанциях природного газа, мазута, каменного угля. В результате, во-первых, ухудшается экологическая обстановка, а во-вторых, происходит истощение невозобновляемых природных ресурсов.

Для снижения расхода электроэнергии в водопроводном хозяйстве могут применяться новейшие модели насосов с более высоким КПД, регулируемый привод насосных агрегатов, трубы из современных материалов и т.д. Кроме технических средств, важную роль в энергосбережении играет точность расчетов системы подачи и распределения воды, так как от проектировщика во многом зависит величина затрат энергии на куб поданной воды. Так, например, от правильности определения диаметров участков распределительной сети будут зависеть потери напора на преодоление сил трения, а следовательно, и затраты энергии на насосной станции.

Поскольку проектировщики при расчете водопроводных сетей не учитывают характеристики насосов и режим их работы, то нами произведен анализ степени влияния указанных факторов на величину расчетных диаметров участков сети. Под режимом работы насосного оборудования в данной работе понимается зависимость развиваемого напора от подачи насосной станции.

Водопроводные сети проектируются исходя из минимума дисконтированных затрат на строительство и эксплуатацию. Расходы на электроэнергию составляют 30...40 % эксплуатационных затрат. Поскольку водопотребление носит случайный переменный характер, то и затраты энергии насосными агрегатами на подачу воды тоже носят случайный переменный характер. Вычисление затрат энергии на преодоление потерь напора за весь расчетный срок представляет большие практические сложности. Это связано с отсутствием графиков неравномерности водопотребления в течение года, условностью и неточностью графиков часовой неравномерности водопотребления и данных о росте потребления по годам, степени использования насосного оборудования, частичной реконструкции самой системы водоснабжения за расчетный период и, наконец, большой громоздкостью вычислений [1].

При расчете водопроводных сетей годовые затраты энергии на преодоление сил трения определяются исходя из затрат энергии при расчетном режиме с поправкой на коэффициент неравномерности потребления энергии:

$$\sum_{t=1}^T N_t = \gamma N_{\text{расч.}} T,$$

где  $\gamma$  – коэффициент неравномерности потребления энергии;  $N_{\text{расч.}}$  – затраты энергии на преодоление сил трения при расчетном режиме работы, кВт/ч;  $T$  – количество часов в году.

Коэффициент неравномерности потребления энергии определяется как отношение действительных затрат энергии в течение года на преодоление сил трения к затратам энергии, вычисленным исходя из расчетного режима работы за тот же период:

$$\gamma = \frac{\sum_{t=1}^T N_t}{N_{\text{расч.}} \cdot T}. \quad (1)$$

Учитывая, что отношение  $\sum_{i=1}^T N_i / T$  представляет собой среднегодовые затраты энергии, выражение (1) можно представить в следующем виде:

$$\gamma = \frac{N_{\text{сред.}}}{N_{\text{расч.}}}, \quad (2)$$

где  $N_{\text{сред.}}$  – среднегодовые затраты энергии на преодоление сил трения, кВт/ч.

Существует ряд работ [1 – 4], в которых приводятся среднестатистические значения коэффициента  $\gamma$  в зависимости от режима работы насосной станции и типа водопроводной системы. Однако использование ориентировочных коэффициентов неравномерности потребления энергии требует определенного навыка. Для облегчения работы проектировщиков Н.Н. Абрамов разработал соответствующую формулу расчета коэффициента  $\gamma$ . В выражение (2) вместо среднегодовых затрат энергии он предложил с некоторым приближением использовать затраты энергии, соответствующие среднему расходу ( $N_{\text{по ср. расх.}}$ ).

Исходя из вышеуказанного допущения, Н.Н. Абрамов следующим образом выводит формулу для коэффициента неравномерности потребления энергии. Если принять, что водопотребление изменится во всех точках сети одинаково, то суммарную потерю напора в сети  $\Delta h$  можно выразить функцией от подаваемого в нее расхода  $Q$ :

$$\Delta h = S_c \cdot Q^2, \quad (3)$$

где  $S_c$  – фиктивное сопротивление системы водоводов.

Секундный расход воды в день и час максимального водопотребления расчетного года будет составлять

$$Q_{\text{max}} = k_1 \cdot k_2 \cdot Q_{\text{ср}},$$

где  $k_1, k_2$  – коэффициенты соответственно часовой и суточной неравномерности водопотребления;  $Q_{\text{ср}} = k_0 \cdot Q_0$  – среднечасовой расход за рассматриваемый срок работы трубопровода (здесь  $k_0$  – отношение годового расхода воды в расчетный год к среднегодовому расходу за весь срок окупаемости;  $Q_0$  – среднечасовой расход за весь срок окупаемости).

Количество энергии, затрачиваемое за расчетный срок эксплуатации на подачу воды, вычисленное по  $Q_{\text{max}}$ :

$$N_{\text{расч.}} = \frac{H_{\text{нас.}} \cdot Q_{\text{max}} \cdot 24 \cdot 365 \cdot \Gamma}{102 \cdot \eta_1} \approx \frac{86}{\eta_1} \cdot Q_{\text{max}} \cdot (H_s + S_c \cdot Q_{\text{max}}^2) \cdot \Gamma, \quad (4)$$

где  $H_{\text{нас.}}$  – напор насосной станции;  $\eta_1$  – КПД насосных агрегатов при работе в расчетном режиме, доли ед.;  $H_s$  – геометрическая высота подъема воды, м;  $\Gamma$  – срок эксплуатации, годы.

Переменная часть  $N_{\text{расч.}}$ , связанная с потерями напора на трение:

$$N_{\text{расч.}} = \frac{86}{\eta_1} \cdot Q_{\text{max}}^3 \cdot S_c \cdot t,$$

где  $t = 24 \cdot 365 \cdot \Gamma$ .

Та же величина, определенная по среднему расходу за весь расчетный срок:

$$N_{\text{по ср. расх.}} = \frac{86}{\eta_2} \cdot Q_0^3 \cdot S_c \cdot t,$$

где  $\eta_2$  – КПД насосных агрегатов при подаче среднего расхода, доли ед.

Если пренебречь разницей между  $\eta_1$  и  $\eta_2$ , то коэффициент  $\gamma$  должен быть равным

$$\gamma = \frac{N_{\text{по ср. расх.}}}{N_{\text{расч.}}} = \left( \frac{Q_0}{Q_{\text{max}}} \right)^3.$$

Так как

$$Q_{\max} = k_0 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot Q_0,$$

то

$$\gamma = \left( \frac{1}{k_0 \cdot k_1 \cdot k_2} \right)^3. \quad (5)$$

Отметим, что последняя формула получена Н.Н. Абрамовым на основе предположения, что среднегодовые затраты электроэнергии на преодоление сил трения в формуле (2) можно с некоторым приближением заменить затратами электроэнергии за расчетный период, вычисленными по среднему расходу. Рассмотрим сущность сделанного упрощения.

На расход энергии на преодоление сил трения значительное влияние оказывает режим работы и принятые характеристики насосного оборудования. Например, при работе нерегулируемого насоса развиваемый напор будет определяться характеристикой насоса, а не суммарными потерями напора в сети. При этом избыточные напоры могут гаситься в регулирующей арматуре или расходоваться на повышение давления во всей сети. Поэтому выражение (3) не отражает особенности данного режима работы насосной станции, и конечная формула (5) не может давать точный результат для насосов с нерегулируемым приводом.

В случае работы насосной станции с регулируемым насосом, формула (4) тоже не может давать точный результат, несмотря на то, что развиваемый напор будет зависеть именно от потерь напора по сети. Дело в том, что среднему расходу соответствуют вовсе не средние потери напора. Поэтому для случая работы насосного оборудования с регулируемым приводом в формуле (4) нельзя использовать зависимость (3).

*Рассмотрим конкретный пример.* Населенный пункт (25 тыс. чел.) со среднесуточным водопотреблением 6400 м<sup>3</sup>/сут. Вода подается в безбашенную сеть насосом НК 100-200 с диаметром рабочего колеса 200 мм (характеристика насоса приведена на рис. 1). Геометрическая высота подъема равна 10 м, требуемый напор при максимальном водопотреблении - 30 м.

На рис. 2 представлены графики зависимости затрат энергии на преодоление сил трения для двух вариантов работы насосного оборудования: с нерегулируемым и регулируемым приводом. Как видно из рисунка, затраты энергии в значительной степени зависят от режима работы насосного оборудования. Среднему расходу (267 м<sup>3</sup>/ч) для разных режимов работы насосной станции соответствуют совершенно разные затраты энергии.

Для более точного анализа возможности использования формулы, предложенной Н.Н. Абрамовым, рассчитаем затраты энергии для вышеописанных данных на основании конкретного режима водопотребления (таблица). В [5] приведены сведения по распределению часовых расходов в процентном отношении в течение суток в зависимости от численности жителей населенного пункта. Соответствующие данные занесены в графу 2 таблицы.

В графе 3 для каждого часа приведен соответствующий расход, м<sup>3</sup>/ч.

В нашем случае фиктивное сопротивление системы водоводов будет равно

$$S_c = \frac{H_T - H_z}{Q_{\max}^2} = \frac{30 - 10}{400^2} = 1,25 \cdot 10^{-4},$$

где  $H_T$  – требуемый напор насосной станции, м.

Зная фиктивное сопротивление системы трубопроводов, можно найти соответствующие потери напора для каждого расхода. Данные о потерях напора занесены в графу 4 таблицы. Согласно этим данным, средневзвешенные потери напора:  $247,2/24 = 10,3$  м. В то же время среднему расходу (рис. 1) соответствуют потери напора, равные примерно 8,9 м. Таким образом, для насосного оборудования с регулируемым приводом формула (5) неизбежно будет давать ошибочный результат.

Требуемый напор (графа 5 таблицы) можно определять по формуле:

$$H_T = H_z + \Delta h.$$

Далее расчет напора и КПД насосов для двух рассматриваемых режимов работы насосного оборудования будет отличаться. Рассмотрим сначала расчет насоса с нерегулируемым приводом.

Как было уже сказано, развиваемый напор насосом с нерегулируемым приводом зависит от его напорно-расходной характеристики и не зависит от характеристики системы водоводов. Поэтому в графе 6 таблицы приведены значения напоров насоса, взятые с его паспорта для соответствующих расходов.

Поскольку геометрическая высота подъема равна в нашем случае 10 м, то потери напора по сети и в регулирующей арматуре будут определяться по формуле:

$$\Delta h = H_{\text{нас}} - H_z = H_{\text{нас}} - 10,$$

где  $H_{\text{нас}}$  – напор насоса согласно паспортным данным, м.

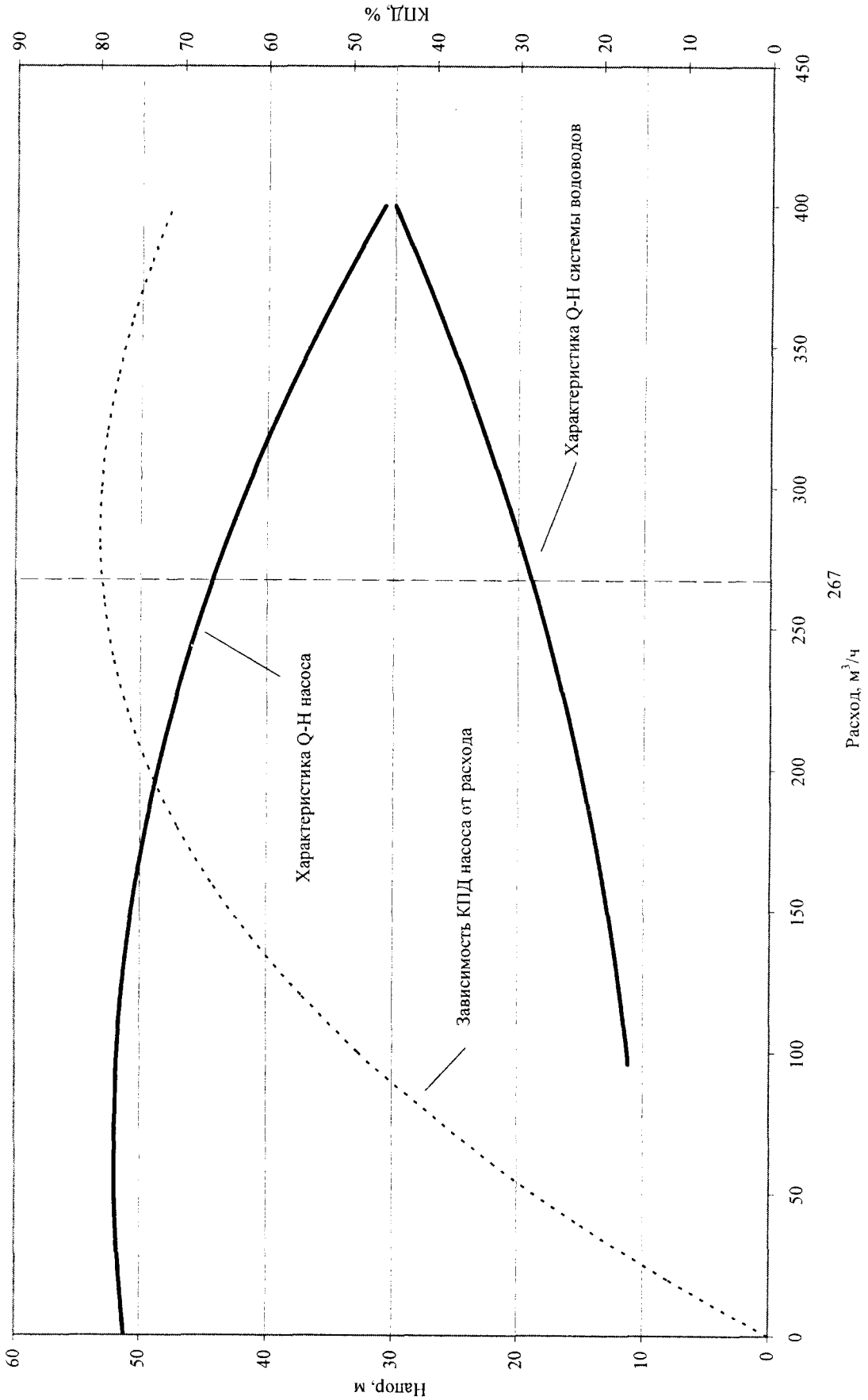


Рис. 1. Совмещенная характеристика насоса НК 100-200 (0200мм) и системы водоводов

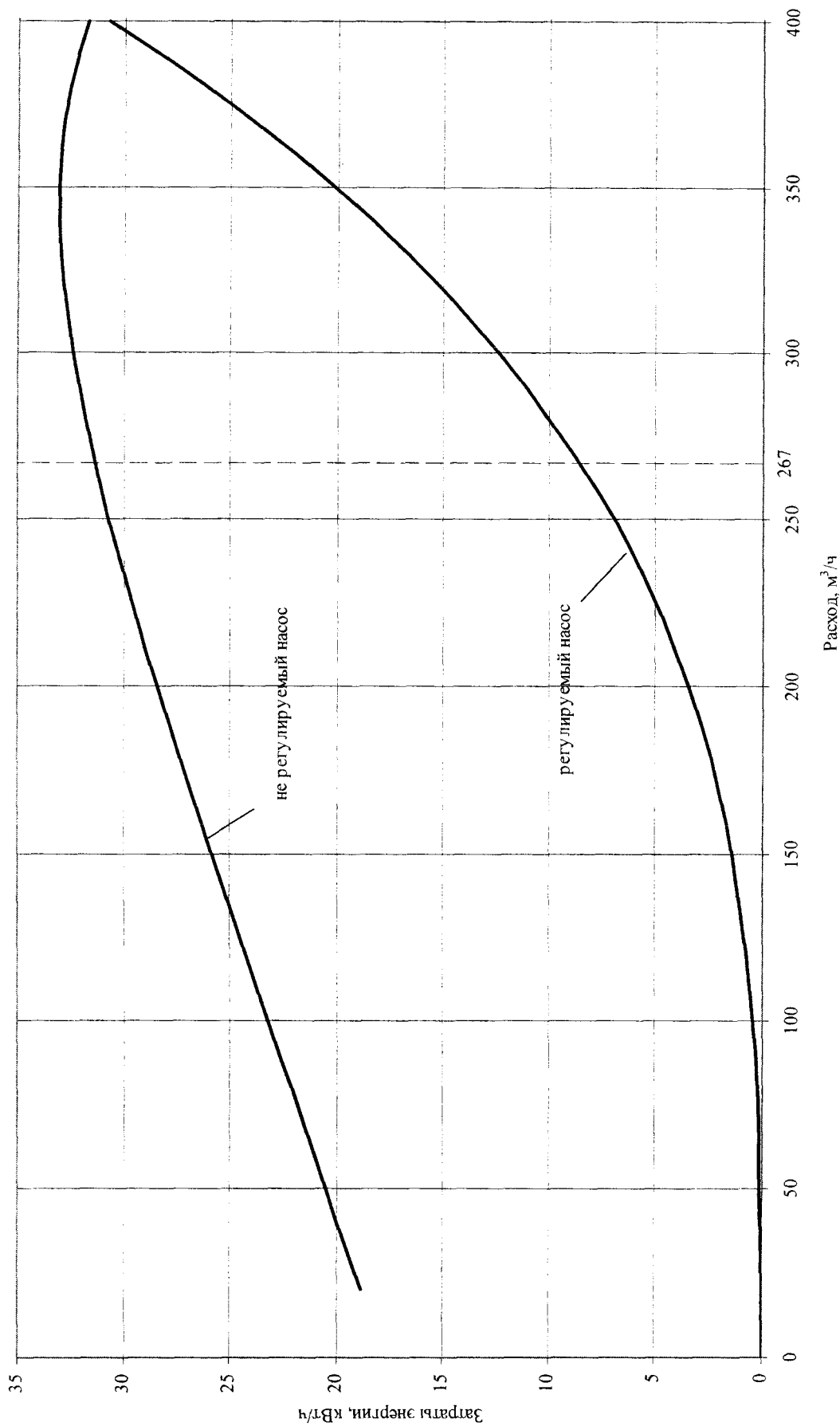


Рис. 2. Зависимость затрат энергии на преодоление сил трения от подачи для различных режимов работы насоса НК 100-200

Расчет затрат энергии для различных режимов работы насосной станции

Часы суток	Часовые расходы, %	Часовые расходы, м <sup>3</sup> /ч	Потери напора, м	Требуемый напор, м	Напор насоса, м	Насос с нерегулируемым приводом			Насос с регулируемым приводом		
						Потери напора, м	КПД, %	Затраты энергии на преодоление сил трения, кВт/ч	Потери напора, м	КПД, %	Затраты энергии на преодоление сил трения, кВт/ч
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	1,5	96	1,20	11,2	51,8	41,8	47,6	22,96	74,00	0,41	
2	1,5	96	1,20	11,2	51,8	41,8	47,6	22,96	74,00	0,41	
3	1,5	96	1,20	11,2	51,8	41,8	47,6	22,96	74,00	0,41	
4	2,5	160	3,20	13,2	50,3	40,3	66,6	26,38	79,80	1,75	
5	3	192	4,60	14,6	49,0	39,0	72,7	28,02	79,10	3,05	
6	3,5	224	6,30	16,3	47,2	37,2	76,9	29,56	77,70	4,93	
7	4,5	288	10,40	20,4	42,6	32,6	79,8	32,06	74,70	10,89	
8	5	320	12,80	22,8	39,7	29,7	78,9	32,81	73,40	15,19	
9	5,25	336	14,10	24,1	38,1	28,1	78,0	32,99	72,80	17,73	
10	6	384	18,40	28,4	32,8	22,8	73,4	32,42	71,40	27,01	
11	6,25	400	20,00	30,0	30,8	20,8	71,3	31,72	70,90	30,71	
12	5,75	368	16,90	26,9	34,6	24,6	75,2	32,84	71,80	23,62	
13	5,25	336	14,10	24,1	38,1	28,1	78,0	32,99	72,80	17,73	
14	5	320	12,80	22,8	39,7	29,7	78,9	32,81	73,40	15,19	
15	5,5	352	15,50	25,5	36,4	26,4	76,7	33,01	72,30	20,53	
16	6	384	18,40	28,4	32,8	22,8	73,4	32,42	71,40	27,01	
17	6,25	400	20,00	30,0	30,8	20,8	71,3	31,72	70,90	30,71	
18	5,75	368	16,90	26,9	34,6	24,6	75,2	32,84	71,80	23,62	
19	5	320	12,80	22,8	39,7	29,7	78,9	32,81	73,40	15,19	
20	4,5	288	10,40	20,4	42,6	32,6	79,8	32,06	74,70	10,89	
21	4	256	8,20	18,2	45,1	35,1	79,2	30,93	76,10	7,50	
22	3	192	4,60	14,6	49,0	39,0	72,7	28,02	79,10	3,05	
23	2	128	2,00	12,0	51,3	41,3	58,3	24,69	78,80	0,91	
24	1,5	96	1,20	11,2	51,8	41,8	47,6	22,96	74,00	0,41	
1-24	100	6400	247,2					714,9		308,8	

Коэффициент полезного действия нерегулируемого насоса (графа 8 таблицы) определяется по соответствующей характеристике в паспорте насоса в зависимости от подаваемого расхода.

Теперь рассмотрим расчет насоса с регулируемым приводом. Такой насос способен развивать напор, равный требуемому, поэтому нет необходимости гасить в регулирующей арматуре избыточный напор.

Для определения КПД регулируемого насоса (графа 10 таблицы) при подаче некоторого расхода  $Q_p$ , с напором  $H_p$ , необходимо на графике характеристики  $Q-H$  насоса построить кривую равных КПД, проходящую через точки  $(Q_p, H_p)$ . Точка пересечения этой кривой с номинальной характеристикой  $Q-H$  насоса определит точку с аналогичным известным значением КПД. В расчете не учитывается КПД частотного преобразователя и двигателя, в связи с отсутствием соответствующих данных и большой трудоемкостью подобных расчетов.

Зная развиваемый насосом напор и КПД для каждого из рассматриваемых расходов, можно рассчитать соответствующие затраты энергии, кВт/ч, по зависимости:

$$N_{\text{наси}} = \frac{Q_i \cdot H_i}{102 \cdot \eta_i},$$

где  $H_i$ ,  $\eta_i$  – соответственно напор, м, и КПД, доли ед. насоса при подаче расхода  $Q_i$ , л/с.

Затраты энергии на преодоление сил трения, кВт/ч, можно определить по зависимости

$$N_i = \frac{Q_i \cdot \Delta h_i}{102 \cdot \eta_i},$$

где  $\Delta h_i$  – потери напора в системе трубопровода и регулирующей арматуре насосной станции, м, при подаче  $Q_i$ , л/с.

Данные по затратам энергии приведены в графах 9 и 11 таблицы.

Произведем расчет коэффициента неравномерности потребления энергии на преодоление сил трения  $\gamma$  для рассматриваемых двух случаев. При расчетном водопотреблении потребляемая мощность насоса на преодоление сил трения с нерегулируемым приводом равна 31,72 кВт/ч, а среднесуточная составляет  $714,9/24 = 29,8$  кВт/ч.

Значит, коэффициент  $\gamma$ , согласно формуле (2), будет равен:

$$\gamma = \frac{29,8}{31,72} = 0,94.$$

Для насоса с регулируемым приводом потребление энергии при максимальном водопотреблении составляет 30,7 кВт/ч, а среднее –  $308,8/24 = 12,9$  кВт/ч. Отсюда коэффициент  $\gamma$  будет равен

$$\gamma = \frac{12,9}{30,7} = 0,419.$$

Теперь рассчитаем коэффициент  $\gamma$  по формуле Н.Н. Абрамова (5). Поскольку в данном примере рассчитываются только годовые затраты энергии, то  $k_0$  учитываться не будет. Произведение коэффициентов неравномерности водопотребления  $k_1$  и  $k_2$ , согласно таблице, будет равно

$$k_1 \cdot k_2 = \frac{Q_{\text{max}}}{Q_{\text{cp}}} = \frac{6,25}{(100/24)} = 1,5.$$

$$\gamma = \left( \frac{1}{k_1 \cdot k_2} \right)^3 = \left( \frac{1}{1,5} \right)^3 = 0,296.$$

Как видно из приведенных выше расчетов, истинные значения коэффициента неравномерности потребления энергии значительно отличаются от значения, полученного по формуле Н.Н. Абрамова. Поскольку коэффициент  $\gamma$  прямо пропорционален затратам энергии на преодоление сил трения, то для рассмотренного примера ошибка в их определении достигает  $0,94/0,296 = 3,17$  раза. Такая неточность в исходных данных неизбежно ведет к неверному определению диаметров участков водопроводной сети.

Формула коэффициента неравномерности потребления энергии, полученная в работе [6], основана на аналогичных допущениях с той лишь разницей, что коэффициент  $\gamma$  определяется для полной высоты подъема. Поэтому отдельно рассматривать данную формулу не имеет смысла.

#### **Выводы**

Произведенные расчеты хорошо демонстрируют, что для одной и той же водопроводной сети при одних и тех же насосах неравномерность потребления энергии существенно зависит от режима работы насосной станции. Очевидно, что потребление энергии также зависит и от характеристик насосов и количества рабочих агрегатов. Поэтому при определении диаметров участков водопроводной сети необходимо ориентироваться на конкретные варианты насосного оборудования и режим работы насосной станции,

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Абрамов Н.Н., Поспелова М.М. Расчет водопроводных сетей. - изд. 2-е - М.: Госстройиздат, 1962. - 230 с.
2. Мошин Л.Ф. Методы технико-экономического расчета водопроводных сетей. - М.: Стройиздат, 1950. - 144 с.
3. Кикачейшвили Г.Е. Расчет оптимальных параметров систем подачи и распределения воды - Тбилиси: Сабчета Сакартвело, 1980 - 200 с.
4. Кемелев А.А. Водопотребление и рационализация систем сельскохозяйственного водоснабжения. - Алма-Ата: Кайнар, 1979. - 124 с.
5. Старинский В.П. Технологические, гидравлические и технико-экономические расчеты в водоснабжении. - Мн.: Вышэйшая школа, 1985. - 200 с.
6. Белан А.Е., Хоружий П.Д. Технико-экономические расчеты водопроводных систем на ЭВМ. - Киев: Высшая школа. - 1979. - 192 с.