

Приборы и Системы.

Управление, Контроль, Диагностика

6•2008

AT/GS

Закрытое Акционерное Общество
АТЛАНТИКТРАНСГАЗСИСТЕМА

МИРОВОЙ УРОВЕНЬ АВТОМАТИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

▷ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

▷ ПОСТАВКА

▷ ИНЖИНИРИНГ

▷ МОНТАЖ

▷ ПУСКОНАЛАДКА

▷ ОБУЧЕНИЕ

▷ СЕРВИС

НА РЫНКЕ
АВТОМАТИЗАЦИИ
с 1992 года



ПРОГРАММНО - ТЕХНИЧЕСКАЯ ПЛАТФОРМА ДИСПЕТЧЕРСКИХ ПУНКТОВ СПУРТ

- Центральный Диспетчерский Пункт
- Диспетчерский Пункт Линейного Производственного Управления
- Программные комплексы ИУС диспетчерского управления



СИСТЕМА ТЕЛЕМЕХАНИКИ СТН - 3000

- Газовые промыслы
- Станции подземного хранения газа
- Магистральные газопроводы
- Газораспределительные станции
- Газоизмерительные станции
- Нефтепродуктопроводы



ЗАО "АтлантИкТрансгазСистема":

109388, Москва, ул. Полбина, 11
Тел./факс: (495) 660-0802 (многоканальный)
E-mail: atgs@atgs.ru, Http: //www.atgs.ru

Список литературы

1. Олифер Н. Резервирование соединений в локальных сетях // Журнал сетевых решений / LAN. 2002. № 1.
2. Богатырев В.А. Отказоустойчивость и сохранение эффективности функционирования многомагистральных распределенных вычислительных систем // Информационные технологии. 1999. № 9.
3. Богатырев В.А. Комбинаторный метод оценки отказоустойчивости многомагистрального канала // Методы менеджмента качества. 2000. № 4.
4. Богатырев В.А. Комбинаторно-вероятностная оценка надежности и отказоустойчивости кластерных систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 6.
5. Богатырев В.А. Надежность и эффективность резервированных компьютерных сетей // Информационные технологии. 2006. № 9.
6. Райнике К., Ушаков И.А. Оценка надежности систем с использованием графов. М.: Радио и связь, 1988.
7. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. СПб.: Питер, 2006.

В.Г. НИКОЛАЕВ, канд. техн. наук

Энергосберегающие способы управления режимами работы группы лопастных насосов, работающих параллельно

В статье рассматриваются вопросы применения новейших энергосберегающих технологий при разработке систем автоматизированного управления группой параллельно подключенных насосных агрегатов при переменной нагрузке. Приведен анализ особенностей работы агрегатов, показано влияние технологических ограничений на потребляемую энергию с учетом таких факторов как: кавитация, установленная мощность электродвигателей, предельная частота вращения рабочего колеса, помпаж. Предложен энергоэффективный способ управления группой насосов, основанный на решении задачи одновременной оптимизации состава и режимов работы насосных агрегатов, оснащенных регулируемым приводом.

The article deals with the problems of application energy saving technologies for automatic control system of vane pumps operating in parallel under varying load. It analyzes aggregates' operating modes peculiarities and shows an influence of processing limits on energy input taking into account such factors as cavitation, electric motor capacity, propeller's limit rotation frequency and surging. The author suggests energy saving control technique for a set of vane pumps. The essence of the technique is solution the simultaneous problem of operational optimization and working mode selection for vane pumps having adjustable drive.

Современные системы подачи и распределения воды достаточно энергоемки и характеризуются значительными колебаниями нагрузки во времени. В наиболее сложных условиях находятся насосные установки, подающие воду непосредственно в водопроводную сеть (например, насосные станции второго подъема, станции подкачки), диапазон изменения нагрузки которых, находится в широких пределах. Значительные колебания нагрузки существенно затрудняют подбор оптимальных параметров и числа насосных агрегатов, а также выбор эффективного способа управления ими. Появление на отечественном рынке регулируемого привода и первый опыт его применения для оснащения насосных агрегатов, входящих в состав параллельно подключенных групп насосов, выявил определенные трудности в управлении

такой системой и поставил целый ряд вопросов, требующих своего разрешения [1].

Сформулируем эти вопросы.

1. Как зависит потребление энергии группой насосных агрегатов от их числа для покрытия одинаковой нагрузки при использовании нерегулируемого электропривода?

2. Какова зависимость потребляемой энергии от числа и параметров устанавливаемых агрегатов при использовании регулируемого привода и как влияет на энергоэффективность выбор способа управления ими?

3. Какую роль на энергопотребление, наряду с технологическими параметрами (диапазон подач, статистическое распределение нагрузки, статистический напор), оказывают ограничения по кавитации, установленной мощности электродвигателей привода, предельно допустимым максимальной и минимальной частоте вращения рабочего колеса?

4. Какой тип регулируемого привода и способа управления наиболее эффективен: индивидуальный с индивидуальным управлением или групповой с синхронным управлением группой насосных агрегатов от одного частотного преобразователя?

5. Каким должно быть с точки зрения энергоэффективности оптимальное соотношение между числом регулируемых и нерегулируемых агрегатов при частичном оснащении насосных установок регулируемым приводом?

Для ответа на эти вопросы необходимо рассмотреть особенности работы насосных агрегатов в составе группы параллельно подключенных насосов. Работа насосного агрегата в составе группы принципиально отличается от условий работы одиночного агрегата. Максимальная подача одиночного агрегата обусловлена минимальным гидравлическим сопротивлением недресселированного трубопровода, и при правильном выборе параметров насоса смещение режимов его работы в область высоких значений подач невозможно. Поэтому рабочая точка одновременно является границей, не допускающей смещение режима работы агрегата в зону возможного возникновения кавитации и перегрузки электродвигателя привода.

При работе в составе группы любое изменение состояния какого-либо агрегата путем его включения в работу (отключения) или регулирование частоты вращения рабочего колеса приводит к изменению состояния всей системы. При этом происходит перераспределение нагрузки между агрегатами, что может привести к увеличению подачи одной группы агрегатов с риском

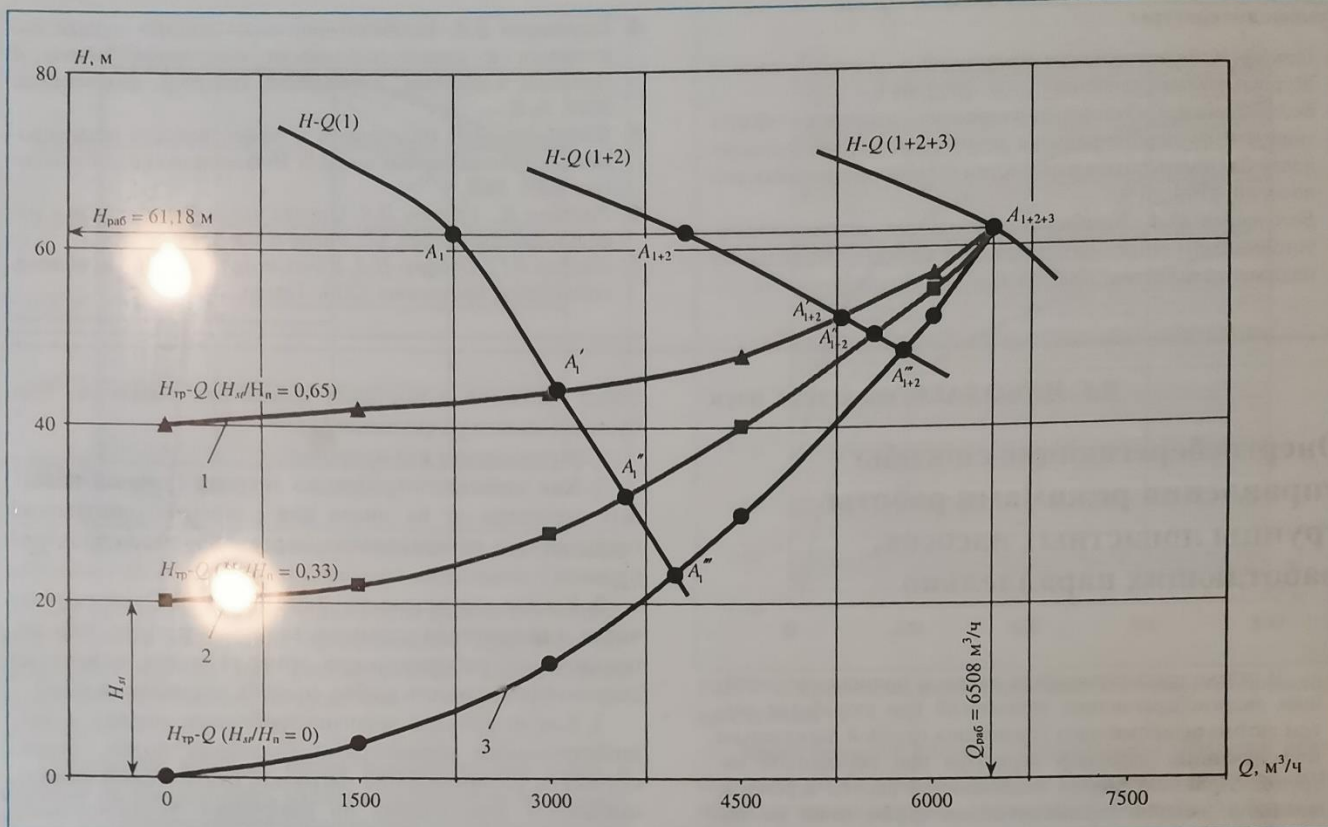


Рис. 1. Перемещение рабочих точек в зависимости от числа одновременно работающих насосов для различных значений статической составляющей требуемого напора, где кривые 1, 2, 3 – характеристики трубопроводной системы при различных соотношениях $H_{ст}/H_n$

попадания их в зону кавитации и перегрузки электродвигателей привода и недогрузки другой группы с риском попадания их в область неустойчивой работы и помпажа.

Для иллюстрации рассмотрим характер перемещения рабочих точек при работе группы из трех нерегулируемых агрегатов в диапазоне подач от 1900 до 6500 м³/ч (рис. 1). Статистическое распределение суточных подач приведено в табл. 1.

Подача трех одновременно работающих насосов (рабочая точка A_{1+2+3}) составляет $Q_{раб} = 6508$ м³/ч, а напор $H_{раб} = 61,18$ м. Рабочие параметры насосов для различного числа работающих агрегатов и соотношений статического $H_{ст}$ и полного напоров H_n приведены в табл. 2. В этой таблице:

- значения КПД насосов для подач в рабочих точках вычислялись из уравнения аппроксимации его характеристики

$$\eta = DQ^2 + EQ + F,$$

где D , E и F – коэффициенты аппроксимации;

- значения потребляемой мощности насосами вычислялись по формуле

$$N = \frac{\gamma Q H}{1000 \eta},$$

где γ – удельный вес жидкости.

Согласно традиционной методике насосы подобраны таким образом, что при одновременной работе всех трех насосов каждый из них находится в оптимальном режиме с параметрами: $Q_{опт} = 2166$ м³/ч; $H_{опт} = 61,18$ м; $\eta_{опт} = 0,75$

Таблица 1

Статистическое распределение суточных подач

Номер интервала	Подача Q , м³/ч	Вероятность P
1	1900	0,0296
2	2100	0,0306
3	2300	0,0256
4	2500	0,0382
5	2700	0,0448
6	2900	0,0491
7	3100	0,040
8	3300	0,0429
9	3500	0,0431
10	3700	0,048
11	3900	0,0429
12	4100	0,0415
13	4300	0,0394
14	4500	0,0371
15	4700	0,0491
16	4900	0,0513
17	5100	0,051
18	5300	0,0491
19	5500	0,0521
20	5700	0,0401
21	5900	0,0401
22	6100	0,0422
23	6300	0,0408
24	6500	0,0314

и $N_{опт} = 481$ кВт. При отключении насоса № 3 в работе остаются насосы № 1 и № 2, а рабочая точка перемещается из положения A_{1+2+3} в одно из возможных положений: A'_{1+2} ; A''_{1+2} или A'''_{1+2} в зависимости от положения

Параметры насосов для различного числа работающих агрегатов

Статистическая составляющая напора и ее отношение к полному напору		Наименование рабочих точек и соответствующие им параметры при работе различного числа насосов											
		№ 1 ($A_1; A_1'; A_1''; A_1'''$)				№ 1 + № 2 ($A_{1+2}; A_{1+2}'; A_{1+2}''; A_{1+2}'''$)				№ 1 + № 2 + № 3 (A_{1+2+3})			
$H_{ст}, м$	$H_{ст}/H_n$	$Q, м^3/ч$	$H, м$	η	$N, кВт$	$Q, м^3/ч$	$H, м$	η	$N, кВт$	$Q, м^3/ч$	$H, м$	η	$N, кВт$
61,18	1,0	2166	61,18	0,75	481	4332	61,18	0,75	2×481	6508	61,18	0,75	3×481
40,0	0,65	3038	44,61	0,63	585	5232	53,68	0,72	2×530	6508	61,18	0,75	3×481
20,0	0,33	3516	32,03	0,46	665	5574	50,24	0,69	2×552	6508	61,18	0,75	3×481
0	0	3857	21,51	0,29	780	5769	48,1	0,67	2×564	6508	61,18	0,75	3×481

Обозначения величин: Q – подача; H – напор; η – КПД насосов; N – мощность, потребляемая электродвигателями приводов насосов в соответствующих рабочих точках (см. рис. 1)

характеристики водовода. Потребляемая каждым насосом мощность N_T возрастает с 481 до 564 кВт. При отключении двух насосов потребляемая мощность оставшегося в работе одного насоса (рабочая точка A_1'') возрастает с 564 до 780 кВт.

Одновременно с увеличением подачи происходит падение напора и КПД насосов (см. табл. 2) и возрастает вероятность попадания их режимов в область кавитации и перегрузки электродвигателей привода. С целью недопущения возникновения указанных явлений при работе группы агрегатов необходимо рассмотреть все возможные состояния такой системы. Для группы, состоящей из n нерегулируемых агрегатов, число возможных состояний равно 2^n , т. е. для типовой насосной станции с шестью агрегатами число возможных состояний составляет 64. В отличие от системы с регулирующими агрегатами, когда состояние системы меняется только от того, включен (или отключен) тот или другой насосный агрегат, работа агрегатов с регулируемым приводом имеет некоторые особенности. Главной из них является та, что регулируемый агрегат имеет плавающие характеристики, зависящие от такого управляемого параметра, как частота вращения его рабочего колеса. Поэтому, для какого либо фиксированного на данный момент времени значения напора в напорном коллекторе для одного агрегата будет возможна не единственная подача, как это имеет место при работе нерегулируемых насосов, а целый диапазон подач, находящийся в пределах:

$$Q_{ij}^{\min} \leq Q_{ij} \leq Q_{ij}^{\max},$$

где Q_{ij} – подача i -го агрегата в j -ом статистическом интервале подач для фиксированного значения напора $H_j, м^3/ч$.

С целью учета всех возможных состояний для группы агрегатов с регулируемым приводом и недопущения выхода за пределы ограничений нами составлена матрица состояний, включающая не два, как обычно, а четыре возможных состояния агрегата: 0 – насосный агрегат отключен; 1 – насосный агрегат включен; 2 – работа на левой границе интервала подач, $Q_{ij} = Q_{ij}^{\min}$; 3 – работа на правой границе интервала подач, $Q_{ij} = Q_{ij}^{\max}$.

Для насосной станции с шестью агрегатами число возможных состояний системы составит 4^n , т. е. 4096. Эффективное управление такой системой невозможно без применения современных средств автоматики, разработки и использования алгоритмов управления, позволяющих контролировать работу системы в рамках принятых ограничений. Поскольку границы системы,

состоящей из группы насосных агрегатов, складываются из границ областей допустимых режимов работы отдельных агрегатов, необходимо четко очертить границы области возможных режимов работы каждого отдельно, входящего в состав группы, агрегата.

Для этого была разработана математическая модель работы насосного агрегата с регулируемым приводом и составлена специальная компьютерная программа “SKAN-NAS”, позволяющая сканировать его характеристики в представляющем практический интерес диапазоне нагрузок. При этом, в качестве исходных данных о насосе, принимаются его напорная и кавитационные характеристики, а также характеристика КПД. В качестве исходной информации в программу вводятся следующие параметры: мощность электродвигателя привода; разность отметок уровня воды в приемном резервуаре и оси рабочего колеса; зависимость потерь напора на всасывающей линии насоса от его подачи; максимально и минимально допустимые значения коэффициента K частоты вращения ($K = n/n_n$, где n – текущая частота вращения рабочего колеса, n_n – номинальная); минимально допустимые значения КПД.

Ввиду ограниченного объема данной публикации остановимся только на методике определения таких наиболее важных для практики ограничений, как кавитация и предельно допустимая подача по установленной мощности электродвигателя привода насоса. Предельно допустимое значение подачи регулируемого насосного агрегата из условия недопущения возникновения явления кавитации может быть определено из следующего выражения

$$F_k = \frac{P_a}{\gamma} - \frac{P_{н.п}}{\gamma} - \Delta h_{кр} - h_{w}^{вс.л} - h_{вс}, \quad (1)$$

где F_k – кавитационный функционал, м; P_a и $P_{н.п}$ – атмосферное давление и давление насыщенного пара, Па; $\Delta h_{кр}$ – критическое значение кавитационного запаса, определяемое по кавитационной характеристике насоса в зависимости от его подачи и частоты вращения рабочего колеса, м; $\Delta h_{кр} = 10 \left(\frac{n_r \sqrt{Q}}{C} \right)^{4/3}$, C – коэффициент

кавитационной быстроходности, м; $h_w^{вс.л}$ – гидравлические потери напора на всасывающей линии насоса, зависящие от его подачи; γ – удельный вес воды, Н/м³; $h_{вс}$ – высота всасывания насоса, принимаемая равной разности отметок уровня воды в резервуаре и оси рабочего колеса, м; $h_{вс} = \alpha Q^2$, α – коэффициент пропорциональности.

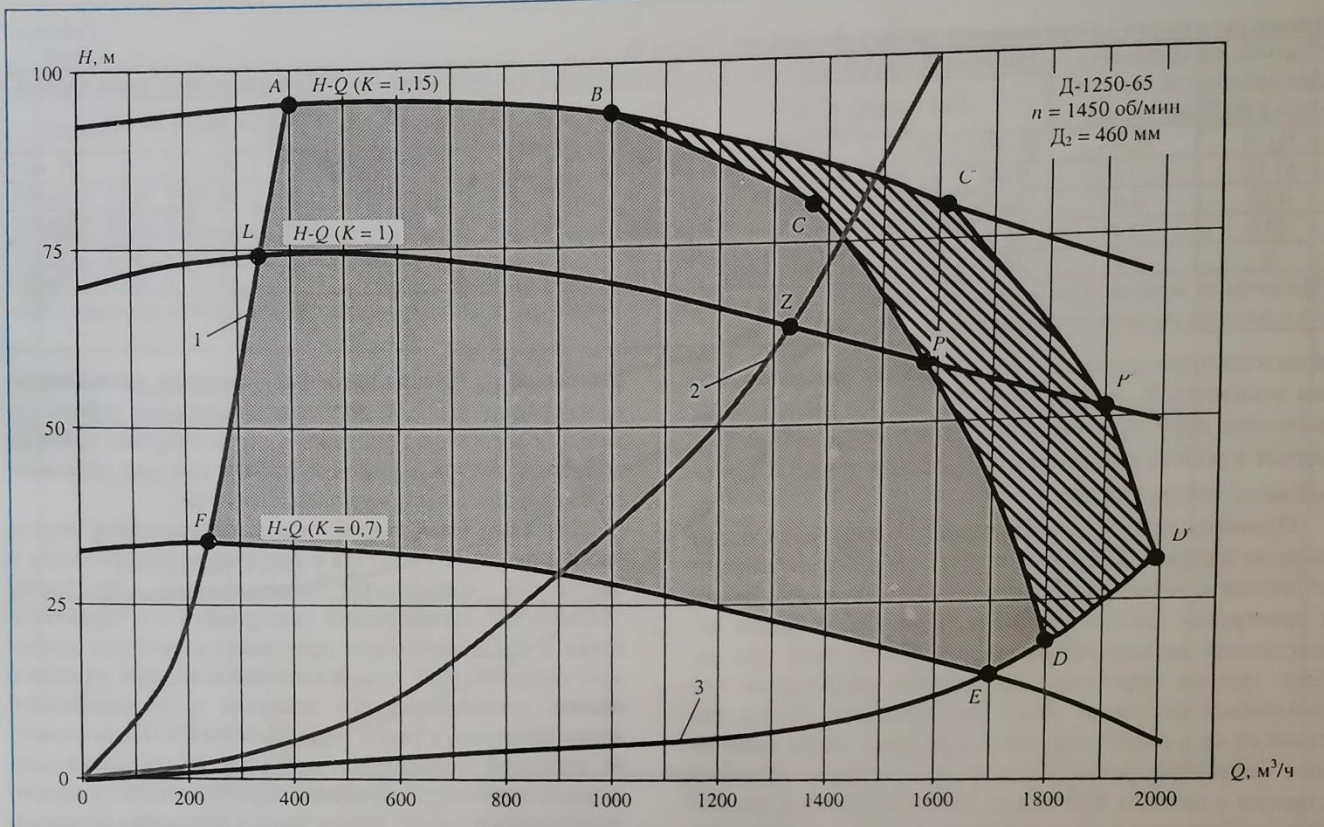


Рис. 2. Область возможных режимов работы насоса Д-1250-65 с регулируемым приводом (с учетом ограничений), где графики 1, 2, 3 – кривые подобных режимов, соответствующие принятым ограничениям по помпажу, максимальному КПД и принятому значению КПД, соответственно

Максимально возможную подачу определяем из формулы (1) для принятого (фиксированного) значения требуемого напора, решая уравнение относительно подачи Q методом последовательных приближений, принимая $F_k = 0$.

Предельно допустимую подачу с точки зрения недопущения перегрузки электродвигателя привода насоса можно получить из выражения

$$N_T - N_{дв} = 0, \quad (2)$$

где N_T – текущая мощность, потребляемая электродвигателем привода, кВт,

$$N_T = \frac{\gamma Q H}{1000 \eta}.$$

Здесь H – напор, для которого определяется максимально возможная подача, м; η – КПД, вычисляемый в зависимости от подачи и частоты вращения рабочего колеса.

Предельно допустимое значение подачи может быть получено из формулы (2), решением уравнения для фиксированного значения напора методом последовательных приближений.

В качестве примера на рис. 2 приведены результаты построения области возможных режимов работы насосного агрегата Д-1250-65 с регулируемым приводом. Из приведенного рисунка видно, что область возможных ограничений представляет собой криволинейный многоугольник $ABCPDEFLA$, каждая сторона которого представляет ограничения по определенному параметру: помпажу ($ALFO$); кавитации (CPD); предельно

допустимой частоте вращения рабочего колеса (AB); допустимой мощности электродвигателя привода насоса (BC). Правая граница ограничений $BCPD$ получена для установленной мощности электропривода $N_{дв} = 350$ кВт и высоты всасывания $h_{вс} = 0$. Повышение уровня воды в приемном резервуаре (или снижение отметки оси насоса) на 3 м водного столба и установка электродвигателя привода $N_{дв} = 450$ кВт позволит существенно расширить область возможных режимов работы насоса (см. рис. 2, кривая $BC'P'D'$).

В этой связи представляет значительный интерес исследование влияния возможностей расширения области допустимых режимов работы насосного оборудования на его энергоэффективность путем смягчения некоторых наиболее жестких ограничений. Под жестким характером ограничений будем понимать такие ограничения, превышения которых могут привести к выходу оборудования из строя, нарушению его механической прочности и созданию аварийной ситуации. Если снятие ограничений по мощности электродвигателя привода насоса решается заменой его на другой двигатель, большей мощности, то послабление ограничений по кавитации может быть решено более сложным путем: понижением отметки оси рабочего колеса по отношению к уровню воды в приемном резервуаре; применением насосов с повышенной кавитационной устойчивостью; использованием специальных эжектирующих устройств на всасывающей линии насоса.

Вопрос о влиянии снятия ограничений по кавитации на работу лопастного насоса изучался нами ранее путем испытаний крупных насосных агрегатов в натурных

Результаты вычисления энергопотребления для различного числа насосных агрегатов

Число установленных насосов n , шт.	Подача и мощность насоса на оптимальном режиме		Мощность электродвигателей привода насосов $N_{дв}$, потребляемая насосной станцией энергия за год S_w при $H_{ст} = 30$ м			
			При наличии ограничений		При отсутствии ограничений	
	$Q_{опт}$, м ³ /ч	$N_{опт}$, кВт	$N_{дв}$, кВт	S_w , тыс. кВт·ч	$N_{дв}$, кВт	S_w , тыс. кВт·ч
1	6500	1444	1500	10453	1500	10453
2	3250	722	750	9654	850	8969
3	2167	482	500	9180	700	8292
4	1625	361	400	8581	550	8197
5	1300	288	350	8296	450	8166
6	1083	240	300	8012	350	7953

условиях [2, 3]. Всего было испытано три насоса: 20Р-11М, 500-60 и ЗГМ-2М. С целью исключения одновременного влияния ограничений по мощности двигателей привода и кавитации все насосы были оснащены электродвигателями с достаточным запасом мощности. Ослабление ограничений по кавитации насосов 20Р-11М и 500-60 осуществлялось путем снижения вакуума на входе в насосы с помощью эжекторов, установленных на всасывающих линиях насосов, а для насоса ЗГМ-2М – путем погружения его под уровень воды на глубину от 2 до 4 м водного столба. Результаты испытаний показали возможность устойчивой и эффективной работы насосов в области подач в 1,5...1,8 раза превышающих номинальную.

С целью изучения влияния ограничений по мощности электродвигателя привода насосов на энергопотребление рассмотрим работу насосных станций покрывающих одну и ту же нагрузку различным числом одновременно работающих насосных агрегатов при дросселировании трубопроводной системы. Результаты вычисления энергопотребления (при $H_{ст} = 30$ м) для различного числа насосных агрегатов и их параметров на оптимальном режиме приведены в табл. 3.

Результаты построения графической зависимости потребляемой энергии от числа работающих насосных агрегатов приведены на рис. 3.

Из данных табл. 3 и графика рис. 3 видно, что снятие ограничений по мощности электродвигателей привода (при отсутствии явления кавитации) позволяет при переходе от одного агрегата к двум, трем или четырем агрегатам существенно снизить потребление энергии. Однако, при дальнейшем увеличении числа агрегатов до пяти, шести снятие ограничений по мощности незначительно снижает потребляемую энергию.

Рассмотрим вопрос влияния ограничений по предельной частоте вращения рабочего колеса на энергопотребление насосного агрегата при переменной нагрузке. Заводы-изготовители насосного оборудования допускают кратковременное превышение текущей частоты вращения рабочего колеса по отношению к номинальной не более, чем на 10...15 %. Повышение частоты вращения сверх

номинальной влечет за собой возрастание осевых и радиальных усилий в насосе, а, следовательно, к увеличению механической нагрузки на корпус насоса. Решение вопроса о возможности повышения частоты вращения рабочих колес насосов на 20...30 % выше номинальной не встречает неразрешимых конструктивных проблем, однако относится к области гидромашиностроения, и поэтому не может быть предметом рассмотрения данной публикации. Нас интересует другая сторона этого вопроса, а именно: оценка влияния смягчения ограничений по предельной частоте вращения рабочего колеса на энергопотребление насосного агрегата при его работе с переменной нагрузкой.

Ввиду сложности гидравлических и электромеханических процессов, протекающих при работе групп параллельно подключенных агрегатов, наблюдается отставание теоретической базы, связанной с решением задач оптимизации (минимизации) затрат энергии при совместной работе группы агрегатов. Из-за отсутствия достаточно обоснованных и энергоэффективных алгоритмов управления насосными станциями в настоящее время в системах их автоматизации для управления используются не основные параметры, характеризующие эффективность работы насосного агрегата (напор, подача, КПД и потребляемая энергия), а такие косвенные

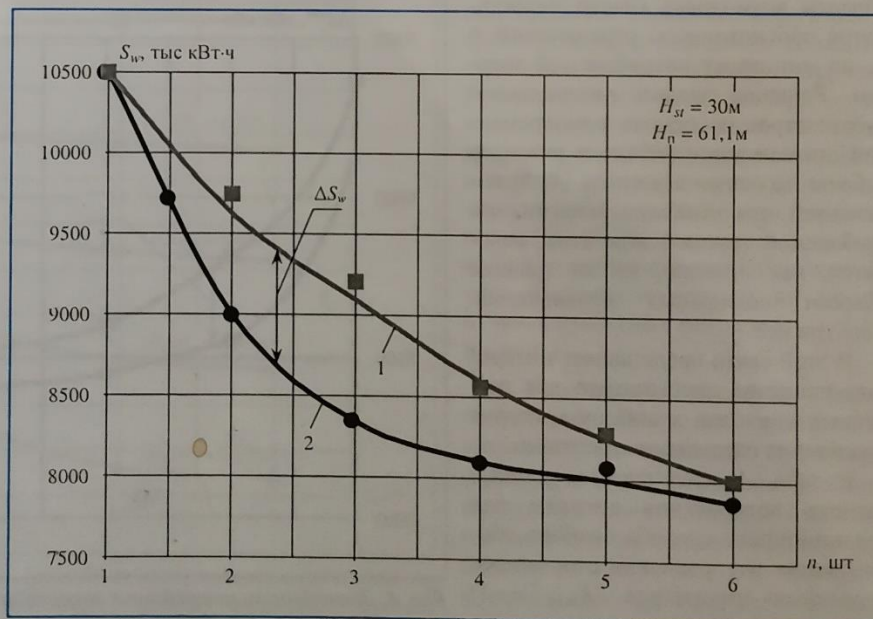


Рис. 3. Зависимости затрат энергии, потребляемой насосной станцией за год, при дросселировании трубопроводов от числа работающих насосных агрегатов при наличии ограничений по мощности (1) электродвигателей привода и при их отсутствии (2)

Зависимость затрат энергии от числа насосных агрегатов для различных ограничений по предельно допустимой частоте вращения рабочего колеса

Наименование показателя		Затраты энергии, потребляемой насосной станцией за год S_w (тыс. кВт·ч) для различного числа насосных агрегатов					
		1	2	3	4	5	6
Максимальное значение коэффициента частоты вращения рабочего колеса $K_{\max}$	1,0	9427	8813	8605	8540	8469	8409
	1,1	9427	8541	8441	8398	8370	8352
Экономия электроэнергии ΔS_w , тыс. кВт·ч		0	272	164	142	99	57

параметры, как нагрузка электродвигателя по току и предельно допустимая для электродвигателя частота тока, подводимого от частотного преобразователя. Включение (отключение) насосов в существующих системах автоматического управления производится по допустимому току нагрузки электродвигателя (подобранного по устаревшей методике) или по предельной частоте тока ($f = 50$ Гц), что соответствует переключению при достижении номинальной частоты вращения рабочего колеса. Вопрос о возможности и целесообразности повышения частоты вращения рабочего колеса насоса выше номинальной с целью снижения энергопотребления в литературе не рассматривается.

Следует подчеркнуть, что работа лопастных насосов в области подач, превышающих оптимальную, или повышение частоты вращения рабочего колеса выше номинальной, открывают возможность переноса "центра тяжести" характеристики КПД из области максимальных подач в область её наиболее вероятных значений. Это обстоятельство позволяет использовать ниспадающую ветвь характеристики КПД (лежащую правее максимального значения) в области его достаточно высоких значений. При использовании традиционной методики выбора оборудования и способов управления им эта часть характеристики КПД остается невостребованной.

Использование для управления насосами указанных выше косвенных параметров, означает, что переключение насосов происходит на границе области возможных (часто недостаточно обоснованных) ограничений, а не по минимуму потребляемой энергии. Решение задачи минимизации энергозатрат на основе одновременной оптимизации состава и режимов работы насосных агрегатов [4, 5] показывает, что минимум энергии, потребляемой группой агрегатов, находится, как правило, не на границе области возможных ограничений, а внутри неё.

В этой связи представляет интерес сопоставление энергозатрат для различных подходов к выбору критерия управления насосными агрегатами.

В табл. 4 представлены данные расчета потребления энергии для традиционного способа подбора оборудования и управления с помощью косвенных параметров ($K_{\max} = 1$) и с помощью рекомендуемого алгоритма оптимизации ($K_{\max} = 1,1$). По данным табл. 4 построена зависимость

потребления энергии группой агрегатов при стабилизации давления в напорном коллекторе от числа установленных насосных агрегатов (рис. 4). Из приведенных данных видно, что использование алгоритма одновременной оптимизации числа и состава насосных агрегатов существенно эффективней традиционно применяемых способов управления. Наиболее значительный эффект экономии энергии при покрытии одинаковой нагрузки с использованием различного числа насосов может быть получен при включении в параллельную работу двух или трех агрегатов, но при дальнейшем увеличении их числа эффективность применения оптимизации заметно снижается.

Применение регулируемого электропривода (РЭП) требует значительных капитальных затрат на его закупку, монтаж и наладку. Поэтому с целью минимизации капитальных вложений довольно часто прибегают к оснащению РЭП не всех установленных на насосной станции агрегатов, а только их части. В современной технической литературе отсутствуют достаточно обоснованные рекомендации по оптимизации соотношения между числом регулируемых и нерегулируемых агрегатов. Лезнов Б.С. [6] рекомендует принимать число регулируемых одноступенчатых агрегатов равным не менее 1/3 от всех установленных, а в случае применения разнотипных агрегатов суммарная подача регулируемых агрегатов должна составлять не менее 1/3 подачи

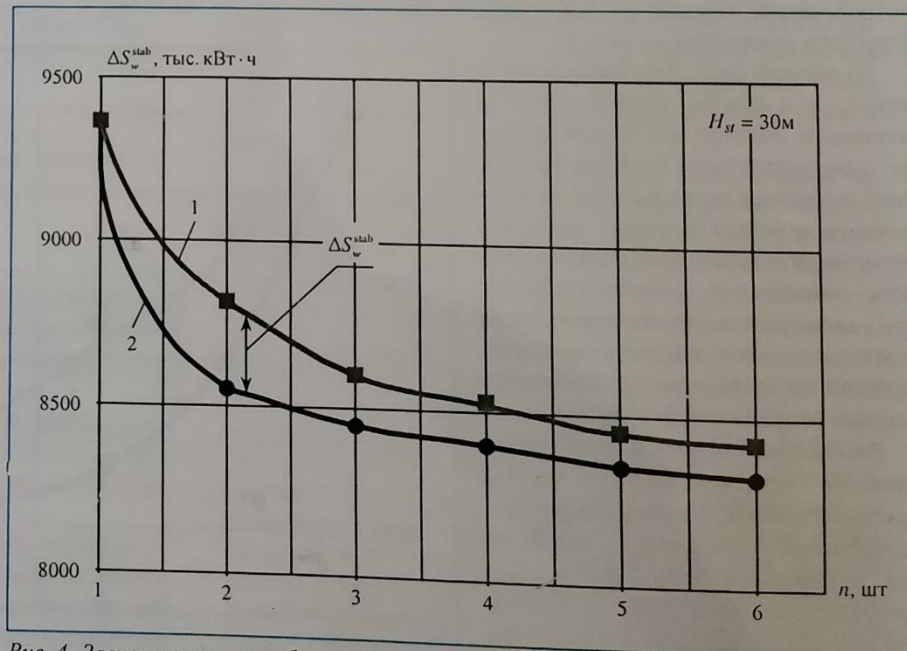


Рис. 4. Зависимости потребления энергии за год насосной станцией от числа насосных агрегатов при стабилизации давления в напорном коллекторе для различных значений ограничений по предельной частоте вращения рабочего колеса: 1 — $K_{\max} = 1$; 2 — $K_{\max} = 1,1$

насосной станции. Такой подход, по нашему мнению, не достаточно полно учитывает влияние технологических условий работы насосов на эффективность применения регулируемого привода.

На рис. 5 приведены результаты моделирования работы насосной станции с пятью установленными насосными агрегатами при различных значениях отношения регулируемых агрегатов $n_{\text{рег}}$ к их общему числу n . Из приведенных зависимостей видно, что оснащение только одного агрегата регулируемым приводом не позволяет реализовать все требуемые режимы работы и только установка двух регулируемых агрегатов способна обеспечить управление насосной станцией на всем возможном диапазоне изменения нагрузки. Если при минимизации избыточных напоров в системах с большим отношением статической составляющей к полному напору $H_{\text{ст}}/H_{\text{п}}$ наращивание числа регулируемых агрегатов к нерегулируемым более 1/3 не оказывает существенного влияния на энергопотребление, то с убыванием статической составляющей напора ($H_{\text{ст}}/H_{\text{п}}$ меньше 0,7) потребление энергии существенно зависит от числа регулируемых агрегатов. Поэтому при определении числа регулируемых агрегатов по отношению к их общему числу необходимо тщательно учитывать влияние статической составляющей напора, а также ограничений по кавитации и помпажу. При стабилизации давления соотношение $n_{\text{рег}}/n$ практически не оказывает влияние на энергопотребление (см. кривую 2 на рис. 5).

Для сопоставления эффективности применения различных способов управления и получения зависимости энергопотребления для разного числа установленных агрегатов представляют интерес результаты математического моделирования работы группы насосных

агрегатов для одинаковых условий их эксплуатации. Моделирование проводилось с учетом ограничений на основе решения задачи минимизации энергозатрат путем одновременной оптимизации состава и режимов работы насосных агрегатов с использованием для распределения нагрузки между агрегатами оптимизационного метода неопределенных множителей Лагранжа. Результаты вычислений затрат энергии, потребляемой группой агрегатов, для различных способов управления и их числа приведены в табл. 5. По данным таблицы построены графики зависимости потребляемой насосными агрегатами энергии от их числа и способов управления. Результаты построения приведены на рис. 6. Номера кривых на рисунке, характеризующих энергопотребление, соответствуют номера способов управления, приведенные в табл. 5. Полученные результаты потребления энергии показывают, что наиболее энергоэффективным способом управления группой агрегатов при переменной нагрузке является минимизация избыточных напоров. При анализе полученных данных становится очевидно, что увеличение числа агрегатов с одного до трех, четырех приводит к существенному снижению потребления энергии, но при дальнейшем наращивании их числа теряется экономическая целесообразность, так как затраты на покупку, монтаж и эксплуатацию большого числа насосов не покрываются получаемой прибылью от экономии энергии. Точное число агрегатов должно определяться в каждом конкретном случае отдельно с составлением технико-экономического обоснования.

Из рассмотренных способов минимизации (см. табл. 5) наибольший энергетический эффект достигается в случае применения одновременной оптимизации режимов работы и состава из разнотипных насосных агрегатов.

Оптимальные параметры разнотипных агрегатов определяются предварительно на стадии выбора оборудования путем увязки характеристик подбираемых насосных агрегатов с трубопроводной системой и статистическим распределением нагрузки. Рекомендуемый метод выбора оптимального числа агрегатов, их параметров и способов управления обеспечивает существенную экономию энергии (от 15 до 20 %), что позволяет на 95...99 % использовать имеющийся потенциал энергосбережения, чего невозможно достичь ни одним из иных известных методов.

Выводы

1. Укрупнение насосных агрегатов при покрытии достаточно широких диапазонов нагрузок ($0,25Q_{\text{max}} \leq Q \leq Q_{\text{max}}$) одним насосом связано со значительными отклонениями фактических режимов его работы от оптимального. Это приводит к длительному времени работы насоса в области низких значений КПД, а, следовательно, к существенному увеличению потребляемой энергии.

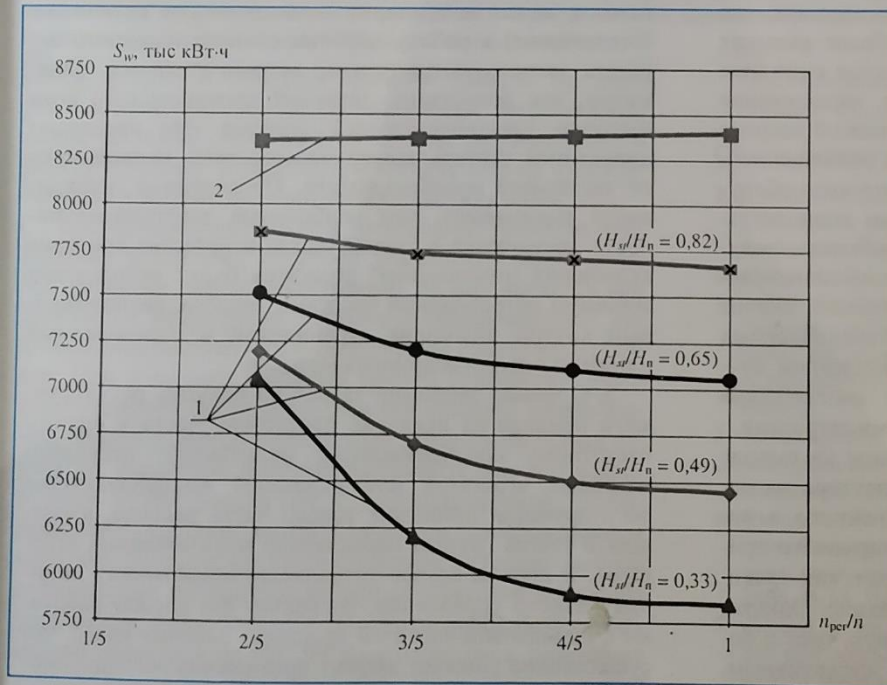


Рис. 5. Зависимости потребляемой энергии группой из пяти насосных агрегатов от соотношения числа насосов, оснащенных РЭП ($n_{\text{рег}}$), к общему числу установленных агрегатов (n) для различных соотношений статического ($H_{\text{ст}}$) и полного ($H_{\text{п}}$) напоров и способов управления: 1 – минимизация избыточных напоров; 2 – стабилизация давления в напорном коллекторе

Зависимость затрат энергии от принятого способа управления

№ п.п.	Способ управления насосными агрегатами, их тип и характеристика привода	Затраты энергии, потребляемой насосной станцией за год S_w [тыс. кВт·ч] (числитель) и степень их приближения к минимально-возможным в % (знаменатель) от числа установленных насосов					
		1	2	3	4	5	6
1	Дросселирование трубопроводов с поинтервальным подключением одноступенчатых нерегулируемых агрегатов	$\frac{10450}{(67,4)}$	$\frac{9131}{(77,1)}$	$\frac{8564}{88,2}$	$\frac{8267}{(85,2)}$	$\frac{8182}{86,1}$	$\frac{8086}{(87,1)}$
2	Стабилизация давления в напорном коллекторе насосной станции с поинтервальным подключением одноступенчатых регулируемых агрегатов с индивидуальным приводом	$\frac{9431}{(74,7)}$	$\frac{8821}{(79,8)}$	$\frac{8621}{(81,7)}$	$\frac{8549}{(82,4)}$	$\frac{8474}{(83,1)}$	$\frac{8452}{(83,3)}$
3	Стабилизация давления в напорном коллекторе насосной станции с одновременной оптимизацией состава и режимов работы одноступенчатых регулируемых агрегатов с индивидуальным приводом	$\frac{9431}{(74,7)}$	$\frac{8548}{(82,4)}$	$\frac{8482}{(83,0)}$	$\frac{8404}{(83,8)}$	$\frac{8375}{(84,1)}$	$\frac{8359}{(84,3)}$
4	Минимизация избыточных напоров в сети с применением группового привода с синхронным управлением одноступенчатыми насосными агрегатами	$\frac{7667}{(91,8)}$	$\frac{7668}{(91,9)}$	$\frac{7680}{(91,7)}$	$\frac{7690}{(91,6)}$	$\frac{7698}{(91,6)}$	$\frac{7702}{(91,4)}$
5	Минимизация избыточных напоров в сети с поинтервальным подключением одноступенчатых регулируемых насосов с индивидуальным приводом	$\frac{7667}{(91,8)}$	$\frac{7353}{(95,8)}$	$\frac{7229}{(97,4)}$	$\frac{7184}{(98,0)}$	$\frac{7147}{(98,5)}$	$\frac{7129}{(98,8)}$
6	Минимизация избыточных напоров в сети с одновременной оптимизацией состава и режимов работы одноступенчатых регулируемых агрегатов с индивидуальным приводом	$\frac{7667}{(91,9)}$	$\frac{7242}{(97,2)}$	$\frac{7189}{(98,0)}$	$\frac{7155}{(98,4)}$	$\frac{7134}{(98,7)}$	$\frac{7119}{(98,9)}$
7	Минимизация избыточных напоров в сети с одновременной оптимизацией состава и режимов работы разнотипных регулируемых насосных агрегатов с индивидуальным приводом	$\frac{7382}{(95,4)}$	$\frac{7141}{(98,6)}$	$\frac{7093}{(99,3)}$	$\frac{7078}{(99,5)}$	$\frac{7064}{(99,7)}$	$\frac{7055}{(99,8)}$
8	Теоретически минимально возможные затраты энергии (значение целевой функции оптимизации)	$\frac{7044}{(100)}$	$\frac{7044}{(100)}$	$\frac{7044}{(100)}$	$\frac{7044}{(100)}$	$\frac{7044}{(100)}$	$\frac{7044}{(100)}$

2. Увеличение числа насосных агрегатов при покрытии одного и того же диапазона подач позволяет значительно сузить диапазон работы каждого агрегата, что приводит к работе насосов в области более высоких значений КПД и обеспечивает значительное снижение потребления энергии. Однако по мере наращивания числа агрегатов темпы снижения потребляемой энергии замедляются, а затраты на приобретение, размещение и монтаж гидравлического и электротехнического оборудования увеличиваются. На определенном этапе затраты на оборудование не покрываются прибылью, получаемой от экономии энергии, поэтому дальнейшее увеличение числа насосов будет нецелесообразно. Значит вопрос о наиболее эффективном числе устанавливаемых агрегатов должен решаться в каждом конкретном случае путем установления оптимального соотношения между капитальными и эксплуатационными затратами.

3. Использование стабилизации давления на выходе насосной установки (или напорном коллекторе насосной станции), как наиболее распространенного в настоящее время способа применения регулируемого привода, при работе одиночного агрегата будет, как правило, более эффективным, чем дросселирование. Однако, по мере увеличения числа агрегатов до двух, трех и более, дросселирование может быть более эффективным, чем стабилизация. Правильный выбор оборудования и операционной схемы управления им, а также учет ограничений позволит получить существенную экономию энергии при дросселировании без установки дорогостоящего регулируемого привода.

4. В используемых в настоящее время системах автоматического управления группами насосных агрегатов в качестве критерия необходимости включения (отключения) в работу дополнительного насосного агрегата используются такие вспомогательные параметры, как допустимое значение электрического тока нагрузки электродвигателей привода или предельно допустимая частота электрического тока, подводимого от частотного преобразователя. Проведенные исследования показывают, что наибольшая энергоэффективность достигается в случае, когда в качестве критерия включения (отключения) агрегатов будет использован минимум потребляемой насосами энергии, расположенный внутри диапазона ограничений и определяемый одним из оптимизационных методов.

5. С целью экономии затрат на покупку регулируемого привода на практике достаточно часто к одному частотному преобразователю подключают несколько насосных агрегатов или оснащают индивидуальным регулируемым приводом только часть насосов, входящих в состав группы параллельно подключенных агрегатов. В первом случае устраняется возможность индивидуального управления, поскольку все насосы работают с одинаковой частотой вращения рабочих колес, что существенно снижает эффект применения регулируемого привода. Во втором – энергоэффективность применения регулируемого привода снижается по мере увеличения соотношений между числом нерегулируемых и регулируемых агрегатов. Кроме того, значительную роль на ее снижение оказывает отношение статической

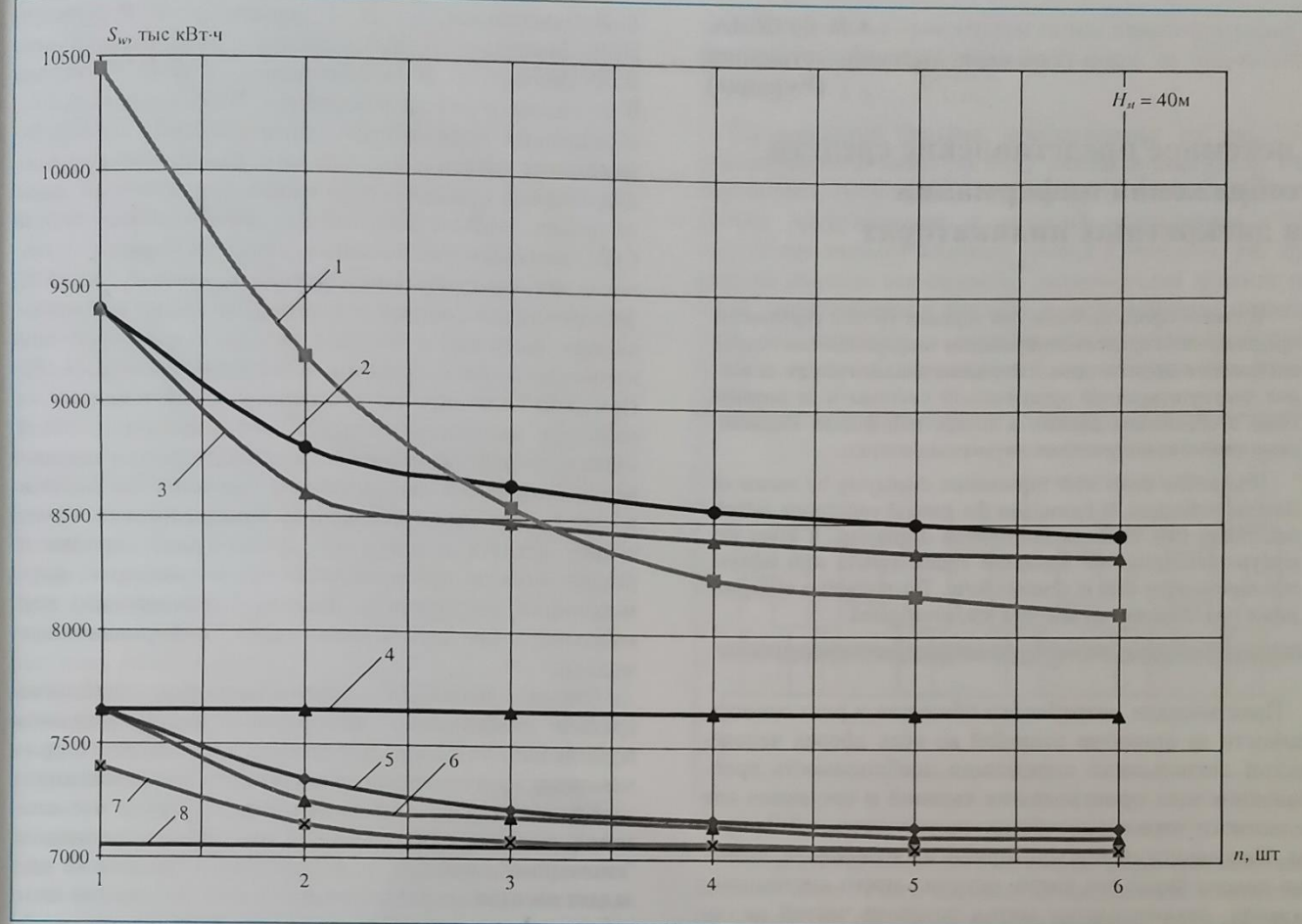


Рис. 6. Зависимости потребляемой насосными агрегатами энергии от их числа при переменной нагрузке для различных способов управления: 1 – дросселирование; 2, 3 – стабилизация давления в напорном коллекторе насосной станции; 4, 5, 6, 7 – минимизация избыточных напоров в сети трубопроводов; 8 – теоретически минимально возможные затраты энергии для заданных условий эксплуатации (значение целевой функции оптимизации)

составляющей к величине полного напора. По мере уменьшения статической составляющей энергопотребление системы, состоящей из группы регулируемых и нерегулируемых агрегатов, становится весьма чувствительным к изменению соотношения между ними.

6. Сравнительный анализ энергоэффективности применения различных способов управления показывает, что наиболее энергоэффективным из них является минимизация избыточных напоров с одновременной оптимизацией состава и режимов работы насосных агрегатов. При этом максимальный эффект (минимум) энергопотребления достигается при применении минимизации напора с использованием разнотипных насосных агрегатов, параметры которых предварительно оптимизируются путем увязки их с характеристикой трубопроводной системы и статистическим распределением нагрузки. Применение рекомендуемой методики выбора оптимальных параметров насосных агрегатов и способа управления ими позволяет получить наибольшую экономию энергии и на 95...99 % использовать потенциал энергосбережения, что не может быть достигнуто ни одним из известных методов.

Работа выполнена в Московском институте коммунального хозяйства и строительства.

Контактный телефон (495) 678-32-73

E-mail: v.g.nikolaev@mail.ru

Список литературы

1. Храменков С.В., Гаврилин Е.Н. Энергосберегающая система управления режимом работы насосной станции // Водоснабжение и санитарная техника. 1999. № 6.
2. Николаев В.Г., Мельников Ю.Ф. Натурные испытания эжекторно-землесосных снарядов на строительстве Камаза. Экспресс-информация серии "Организация производства работ на объектах промышленного и жилищного строительства". М.: Минэнерго СССР. Информэнерго, 1975. Вып. 9.
3. Николаев В.Г. Повышение производительности земснарядов путем применения погружных насосов // Строительные материалы. 1975. № 11.
4. Николаев В.Г. Анализ энергоэффективности различных способов управления насосными установками с регулируемым приводом // Водоснабжение и санитарная техника. 2006. № 11. Часть 2.
5. Способ регулирования работы системы лопастных нагнетателей при переменной нагрузке: Пат. 2230938, РФ / В.Г. Николаев // Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. 2004. № 17. Ч. II.
6. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006.