УДК 622.53 (035.5)

О.В.КАБАНОВ, В.С.СОЛОВЬЕВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*),
С.О.КАБАНОВ
Завод энергозащитных устройств,
Санкт-Петербург

ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ РУДНИЧНОЙ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Оптимальным режимом работы можно считать режим обеспечивающий наименьшие суточные или годовые затраты электроэнергии. Такой режим можно получить путем увеличения КПД до максимального и уменьшением потерь напора в трубопроводах. На стадии проектирования оптимальный режим может быть достигнут с помощью предлагаемой методики расчета режимов работы рудничной насосной установки.

It is possible to consider as an optimum behavior of operation a mode providing the least daily allowance or annual charges of the electric power. Such mode can be received by increase in efficiency up to maximal and reduction of losses of a pressure in pipelines. On design stage the optimum behaviour can be achieved with the help of an offered design procedure of modes of operation of miner pump installation.

Рудничная водоотливная установка обычно включает параллелью работающие центробежные насосы, водосборник, систему трубопроводов, запорно-регулирующую аппаратуру и систему управления (рис.1).

Если приводные электродвигатели снабжены системой регулирования угловой скорости, то с учетом законов пропорциональности турбомашин математическое описание водоотливной установки может быть представлено уравнением параллельно работающих насосов, уравнением параллельно работающих трубопроводов и зависимостью между КПД и подачей насосов:

$$H_2 = H_1 + A_1\overline{\omega}^2 + A_2\frac{Q}{k}\overline{\omega} + A_3\left(\frac{Q}{k}\right)^2; \quad (1)$$

$$H_2 = H_3 + B\left(\frac{Q}{L}\right)^2; \quad (2)$$

$$\eta = \mathrm{C}_1\frac{Q}{k} + C_2\left(\frac{Q}{k}\right)^2 + C_3\left(\frac{Q}{k}\right)^3, \quad (3)$$

где H_1, H_2, H_3 – напоры на входе в насосы, выходе из насосов и в конечном пункте водоотлива; Q – подача насосной установки; A_1, A_2, A_3, C_1, C_2, C_3 – постоянные коэффициенты; B – постоянная трубопровода; k и L – число параллельно включенных насосов и трубопроводов; $\overline{\omega}$ – относительная угловая скорость вала насоса; ω, ω_0 – текущая и паспортная угловые скорости вала насоса, $\overline{\omega} = \omega/\omega_0$; η – КПД насоса.

Как объект проектирования насосная установка характеризуется конструктивными факторами – A_1, A_2, A_3, C_1, C_2, C_3, B и технологическими – $Q_{\text{пр}}$, H_3, L, k, где $Q_{\text{пр}}$ – суточный приток воды. В качестве выходных параметров можно принять фактическую подачу насосной установки на рабочем режиме $Q'_{\text{о}}$, время откачки суточного притока t, суточный расход электроэнергии E.

При традиционном расчете водоотливных установок* предварительно определяется подача

* *Попов В.М.* Водоотливные установки: Справочное пособие. М.: Недра, 1990.

$$Q' = \frac{Q_{\text{пр}} \cdot 24}{t_0}, \qquad (4)$$

где t_0 – регламентируемое время откачки суточного притока.

По данным априорной информации определяют типы насосов и их количество, необходимое для обеспечения подачи Q' и напора H_3.Рассчитывается характеристика трубопровода и определяется ее постоянная B. Графическим или аналитическим способами определяется рабочий режим (O_2 на рис.2), затем определяется время откачки суточного притока воды. Если это время не превышает t_0, то определяют КПД и находят суточные (или годовые) затраты электроэнергии.

Далее изменяют состав и параметры насосной установки и рассчитывают несколько вариантов. Окончательно принимают вариант, обеспечивающий наименьшие затраты. При этом КПД определяется

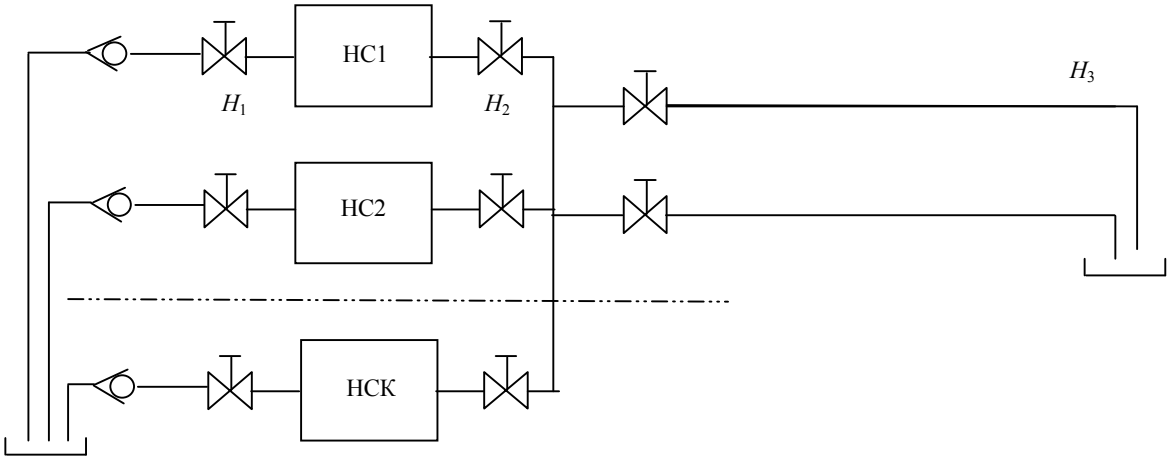


Рис.1. Блок-схема насосной установки

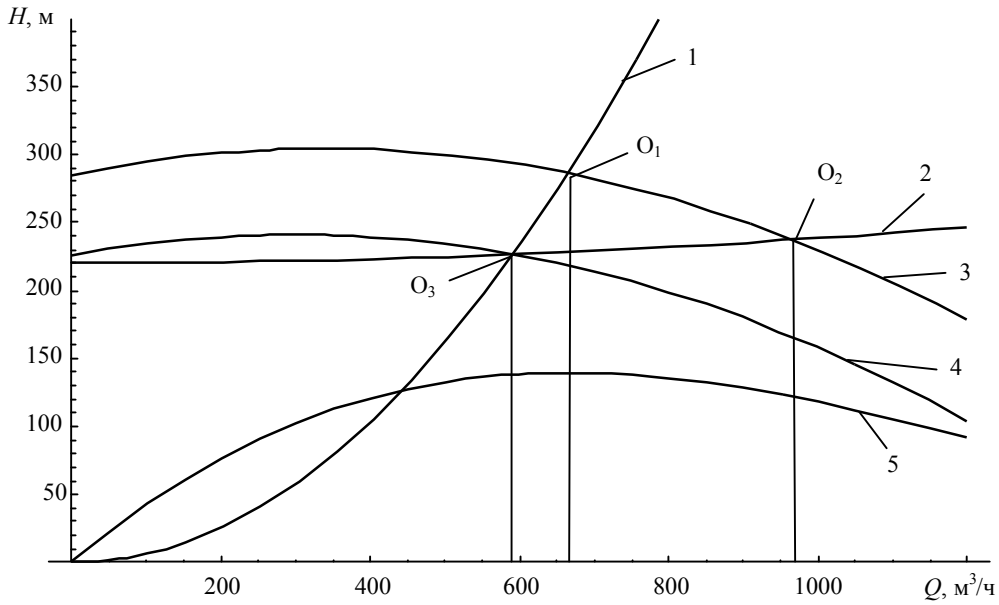


Рис.2. Определение режимов максимальных параметров работы насосной установки

1 – кривая рабочих режимов при КПД; 2 – характеристика трубопровода; 3 – естественная характеристика насосной установки ($\overline{\omega} = 1$); 4 – регулировочная характеристика насосной установки ($\overline{\omega} \neq 1$); 5 – график КПД

после вычисления параметров рабочего режима, и, как правило, его значение меньше максимального.

Оптимальным режимом работы можно считать режим, обеспечивающий наименьшие суточные или годовые затраты электроэнергии путем увеличения КПД до максимального и уменьшением потерь напора в трубопроводах.

Пусть оптимальный режим работы одного насоса, работающего с угловой скоростью ω_0, определен [Q_0 $(H_2 - H_1)_0$, η_{max} (O_1 на рис.2)].

Используя законы подобия, можно записать:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{\omega}{\omega_0} = \overline{\omega}, \quad \frac{H_2 - H_1}{(H_2 - H_1)_0} = \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 = \overline{\omega}^2.$$

Отсюда уравнение линии рабочих режимов работы с максимальным КПД для k параллельно работающих насосов примет вид

$$H_2 = H_1 + \frac{(H_2 - H_1)_0}{Q_0^2 k^2} Q^2. \qquad (5)$$

Значение подачи соответствующей максимальному КПД насоса, можно определить, исследуя уравнение (3) на экстремум:

$$Q_0 = \frac{-C_2 + \sqrt{(C_2^2 - 4C_1C_3)}}{2C_3}. \qquad (6)$$

Подставляя величину в уравнение (1) при $k = 1$ и $\overline{\omega} = 1$, получим величину $(H_2 - H_1)_0$ для максимального КПД.

Оптимальный режим работы насосной установки с максимальным КПД можно определить, решая уравнения (2) и (5) относительно параметров Q и H_2. На рис.2 этому режиму соответствует точка O_3, которую можно определить в пересечении линии 5 с характеристикой сети 2.

Для обеспечения полученного оптимального режима напорная характеристика насосной установки, определяемая уравнением (1), должна пройти через точку O_3. Для этого следует изменить угловую скорость приводных двигателей до значения, определяемого из уравнения (1) или по формуле

$$\overline{\omega} = \frac{-QA_2 + \sqrt{4\alpha k^2 A_1 + Q^2 A_2^2 - 4Q^2 A_1 A_3}}{2kA_1}, \qquad (7)$$

где $\alpha - (H_2 - H_1)$.

В результате получаем новую характеристику насосной установки (кривая 4, на рис.2). Сравнение режимов работы насосной установки в точках O_3 и O_2 показывает, что O_3 кроме увеличения КПД обеспечивает уменьшения напора H_2. При этом необходимым условием работы установки является обеспечение напора H_3 и регламентируемого времени откачки.

При изменении числа насосов, их характеристик или числа трубопроводов насосов параметры оптимального режима изменятся. Поэтому для долговременной работы насосной установки требуется устройство автоматического определения параметров оптимального режима или их корректировки.

Изменение частоты вращения вала насоса можно обеспечить несколькими способами:

- изменение частоты электрического тока с помощью частотных преобразователей;
- применение дисковых гидромуфт;
- применение турбомуфт.

Все эти способы имеют свои достоинства и недостатки. Так, частотные преобразователи обеспечивают минимум энергозатрат, повышают cos φ, но имеют сравнительно большие капитальные затраты на приобретение и монтаж. Стоимость гидравлических муфт и их монтаж ниже частотных преобразователей, однако при передаче энергии они имеют собственные потери.

Таким образом можно назначить следующий порядок расчета водоотливной установки из условия обеспечения оптимального режима работы:

1. Определить подачу водоотливной установки Q' по формуле (4) и построить график $Q' = \text{const}$.

2. Определить постоянную трубопровода B, число трубопроводов L и построить напорную характеристику.

3. Подставляя Q' в уравнение (2), определить значение H_2'.

4. Выбрать насос с наибольшим максимальным КПД; определить $(H_2 - H_1)_0$ и Q_0 по формулам (6) и (1).

5. Решая уравнение (1) относительно k, задавая значения $(H_2 - H_1)'$ и Q' при $\overline{\omega} = 1$, ориентировочно определить необходимое число насосов k' и округлить его в большую сторону до ближайшего целого. Это также можно сделать, используя формулу

$$k' = \frac{Q'\sqrt{(-\varpi^2 A_2^2 + 4(H_2 - H_1)' A_3)}}{2((H_1 - H_2)' + \varpi^2 A_1)}. \quad (8).$$

6. Для выбранного числа насосов построить линию рабочих режимов работы при максимальном КПД (кривая 1 на рис.2). Решая уравнения (2) и (5), определить рабочий режим насосной установки (H_2 и Q, точка O_3 на рис.2).

7. Подставляя полученные значения H_2, Q и k в уравнение (1) и решая его относительно $\overline{\omega}$, определить по формуле (7) рабочую угловую скорость работы насосов.

8. Используя формулу (4), определить время откачки суточного притока t.

9. Определить суточные затраты электроэнергии

$$E = \frac{\rho g (H_2 - H_1) Q t}{\eta} = \frac{\rho g (H_2 - H_1) Q_{\text{ïð}} \cdot 24}{\eta}. \quad (9)$$

В качестве примера возьмем данные по одной из насосных установок Кировского рудника ОАО «Апатит»: водоприток $Q_{\text{пр}} = 400$ м^3/ч; насос ЦНСГ 850-240; $A_1 = 285$ м; $A_2 = 0{,}1143$ ч/м^2; $A_3 = 0{,}0001694$ ч^2/м^5; $H_3 = 220$ м; $k = 1$; $B = 0{,}0000186$ ч^2/м^5; $C_1 = 0{,}237 \cdot 10^{-2}$; $C_2 = 0{,}024 \cdot 10^{-4}$; $C_3 = 0{,}62 \cdot 10^{-9}$; $\omega_0 = 1500$ об/мин.

При традиционном расчете получено $Q = 965$ м^3/ч; $H_2 - H_1 = 237$ м; $\eta = 0{,}609$; время откачки суточного притока $t = 9{,}95$ ч; $\omega = \omega_0$.

При расчете по предложенной методике $Q = 592$ м^3/ч; $H_2 - H_1 = 226{,}5$ м; $\eta_{\max} = 0{,}697$; $k = 1$; $\omega = 0{,}89\omega_0$; $t = 16{,}24$ ч.

Затраты на электроэнергию уменьшились на

$$100\left(1 - \frac{226{,}5 \cdot 0{,}609}{237 \cdot 0{,}697}\right) = 16{,}5\ \%.$$

Выводы

1. На стадии проектирования рудничной насосной установки можно определить параметры, обеспечивающие минимальные затраты электроэнергии.

2. Приведенная методика определения оптимальных параметров позволяет создавать экстремальные системы автоматического регулирования режимов работы рудничных насосных установок.