УДК 622.232.72 (088.8)

А.П.ТУМАНСКИЙ
Российский государственный университет нефти и газа, Москва

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ПЕРЕКАЧКИ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ ПО ТРУБОПРОВОДАМ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ НАСОСНЫМИ СТАНЦИЯМИ С ПОМОЩЬЮ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ НАСОСОВ

Рассматривается оптимизация режимов перекачки нефти или нефтепродуктов путем изменения гидравлических характеристик перекачивающих станций, достигаемого изменением числа оборотов перекачивающих агрегатов с помощью частотно-регулируемого привода. Формулируется задача, предлагается способ ее аналитического решения, обсуждаются компьютерные методы, дающие решение задачи в случае большого числа промежуточных станций. Приводится пример численного расчета.

Обсуждаются задачи регулирования на НПС. Изменение условий перекачки нефти или ее характеристик может привести к нарушению нормального режима работы нефтепровода: появлению кавитации на одних насосных и чрезмерных подпоров на других. Предотвращение подобных явлений и выбор оптимальных режимов работы насосных достигаются регулированием работы насосов.

This article is devoted to optimization of oil swapping modes oil products by changing hydraulic characteristics of pumping our stations which is achieved by changing the number of pumping over units which the help of a frequency adjustable drive.

The problem is formulated, the way of its analytical decision is offered, the computer methods, giving the decision of the problem in the case of a big number of intermediate stations, are considered. The example of numerical calculation is giving.

The problems of regulation on pumping over station. The change of oil swapping conditions or its characteristics can break the normal mode of oil pipeline operations and will cause cavitations on one pumps and extreme supports on others. Prevention of the similar phenomena and a choice of optimum modes of operation pump are achieved by pump work regulation.

Существуют условия, при которых режимы работы системы «насосная – нефтепровод» непрерывно изменяются во времени. О значительных колебаниях пропускной способности свидетельствует коэффициент вариации (отношение S/Q). Используем понятие коэффициента неравномерности работы нефтепровода, который равен квадрату коэффициента вариации:

$$K = \frac{S^2}{Q^2} = \delta^2. \qquad (1)$$

В таблице приведены усредненные показатели неравномерности работы нефтепроводов, полученные по годовым наблюдениям нефтепроводов диаметром от 500 до 1200 мм. Как видно из таблицы, коэффициент вариации пропускной способности нефтепроводов δ изменяется от 0,1 до 0,223, что свидетельствует о значительной неравномерности их работы. Исключая случайные отклонения, диапазон колебаний пропускной способности нефтепроводов с учетом стадийности их ввода находится в пределах 0,3-1,2-проектной пропускной способности. Неравномерность работы нефтепроводов систематически наблюдается также в течение месяцев.

Использование регулируемого привода насоса как исполнительного органа системы автоматического регулирования давления позволяет повысить эффективность регулирования, увеличив пропускную способность нефтепроводов за счет уменьшения зазора

безопасности между уставкой защиты и уставкой регулятора.

Усредненные показатели неравномерности работы нефтепроводов

Диаметр нефтепровода, мм	δ	$\frac{Q_{min}}{Q_{max}}$	$\frac{Q}{Q_{max}}$	Число обследованных нефтепроводов
530	0,121	0,38	0,84	2
720	0,223	0,294	0,584	5
820	0,161	0,394	0,85	6
1020	0,1	0,701	0,829	10
1220	0,16	0,44	0,758	2

Экспериментальные данные показывают, что с уменьшением частоты вращения ротора насоса от расчетного значения КПД насоса снижается. Для приближенной оценки влияния изменения частоты вращения ротора на КПД насоса может быть использована следующая формула:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_p)^{k^{-0,25}}, \qquad (2)$$

где η_p – КПД насоса при расчетной частоте вращения; $k = n_p/n$; n – частота вращения после регулирования; n_p – расчетная частота вращения ротора.

Частоту вращения ротора насоса можно регулировать изменением частоты вращения вала двигателя или используя специальные механизмы, которые изменяют частоту вращения ротора насоса при постоянной частоте вращения вала двигателя. Для регулирования режимов работы насосов изменением частоты вращения ротора может быть применен регулируемый электропривод. В качестве привода используются электродвигатели постоянного и переменного тока. Двигатели постоянного тока позволяют достаточно просто осуществлять регулирование частоты вращения в широком диапазоне, а моментные характеристики двигателей постоянного тока хорошо согласуются с самыми различными характеристиками приводных механизмов. Регулировать частоту вращения таких двигателей можно различными методами (наиболее простой – введение реостата в цепь ротора двигателя), однако у них малый диапазон регулирования, повышенные требования к обслуживанию. Кроме того, с ростом мощности и номинальной частоты вращения наличие коллектора проявляется все в большей степени. Коллектор ограничивает параметры двигателя постоянного тока как по току, так и по напряжению, а следовательно, и по мощности.

В основе гидравлического описания работы участка нефтепродуктопровода, по которому осуществляется перекачка, лежит уравнение Бернулли

$$\left(\frac{p_1}{\rho g} + z_1\right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} + z_2\right) = h_{1\text{-}2}, \qquad (3)$$

в котором p_1 и p_2 – давление в сечениях соответственно x_1 и x_2; z_1 и z_2 – высотные отметки этих сечений, а $h_{1\text{-}2}$ – потери напора на участке трубопровода (x_1 и x_2).

Начальный напор H_1 в линии нагнетания перекачивающей станции складывается из трех составляющих:

$$H_1 = z_1 + \frac{p_1}{\rho q} = z_1 + h_п + H_{ст}(Q), \qquad (4)$$

где $h_п$ – подпор перед станцией (напор в линии всасывания станции); $H_{ст}(Q)$ – дифференциальный напор станции (напор, создаваемый насосами станции).

Последний зависит от производительности трубопровода Q. Он определяется главным образом (Q – H)-характеристиками насосов, их типом и числом, а также характеристиками трубопроводной обвязки станции.

Уравнение балансов напоров

$$[z_1 + h_п + H_{ст}(Q)] - [z_2 + h_к] = h_{1\text{-}2}. \qquad (5)$$

Для участка трубопровода с несколькими перекачивающими станциями

$$\begin{aligned} (z_1 + h_н + F_1(Q)) - (z_2 + h_2) &= h_{1\text{-}2}; \\ (z_2 + h_2 + F_2(Q)) - (z_3 + h_3) &= h_{2\text{-}3}; \\ (z_n + h_n + F_n(Q)) - (z_к + h_к) &= h_{n\text{-}к}. \end{aligned} \qquad (6)$$

Для нормальной работы трубопровода необходимо, чтобы выполнялись так называемые условия согласования. Ограничения на частоту вращения рабочих колес НСА

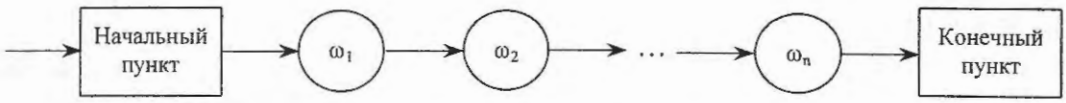


Схема трубопровода

следующие: $p_1 \le p_{max}$; $p_2 \le p_{max}$; $p_3 \le p_{max}$. Из условия минимального значения в линиях всасывания: $h_2 \ge h^*$; $h_n \ge h^*$. Технологические ограничения: $0{,}64 \le (\omega_1/\omega_0)2 \le 1{,}44$; $0{,}64 \le (\omega_2/\omega_0)2 \le 1{,}44$; $0{,}64 \le (\omega_n/\omega_0)2 \le 1{,}44$.

Пусть существует трубопровод с промежуточными насосными станциями, насосы которых оборудованы частотно-регулируемыми приводами (см. рисунок). Задается нужный расход перекачиваемой жидкости Q, причем $Q \ne Q_0$, где Q_0 – номинальный расход. Задача состоит в том, чтобы найти такие ω_1, ω_2, …, ω_n, при которых перекачка была бы возможна. Затраты электроэнергии на транспортировку должны быть минимальны.

Решение:

$$\begin{aligned}(z_1 + h_1 + F_1(Q)) - (z_2 + h_2) &= h_{1-2};\\ (z_2 + h_2 + F_2(Q)) - (z_3 + h_3) &= h_{2-3};\\ (z_n + h_n + F_n(Q)) - (z_k + h_k) &= h_{n-k}.\end{aligned} \qquad (7)$$

Складываем уравнения и получаем

$$a_1x_1 + a_2x_2 + \ldots + a_nx_n = f(Q),$$

где x_1, x_2, … , x_n – соответственно равны $(\omega_1/\omega_0)2$, $(\omega_2/\omega_0)2$, …, $(\omega_n/\omega_0)2$.

Имеем $3n-1$ неравенство, соответствующее условиям согласования. Пример решения для двух станций:

$$h_1 + z_1 + F_1(Q, \omega_1) - (z_2 + h_2) = h_{1\text{-}2};$$
$$h_2 + z_2 + F_2(Q, \omega_2) - (z_k + h_k) = h_{2\text{-}k};$$
$$x_1a_1 + x_2a_2 = f(Q).$$

Запишем условия согласования для данной задачи: $0{,}64 \le x_1 \le 1{,}44$; $0{,}64 \le x_2 \le 1{,}44$; $x_1 \le R(Q)$; $x_1 \ge K(Q)$; $x_1a_1 + x_2a_2 \le f(Q)$.

Из допустимых значений выбираем необходимые по минимальным затратам электроэнергии.

Аналитический метод подходит для решения задач, когда насосных станций не больше трех:

$$N = \frac{\rho g F_1(Q, \omega_1) Q}{\eta_1(Q)} + \frac{\rho g F_2(Q, \omega_2) Q}{\eta_2(Q)}.$$

В остальных случаях задача решается «перебором». Берутся значения частот и компьютер перебором их всех сначала отбирает допустимые значения, а уже из допустимых значений те, при которых затраты электроэнергии будут минимальными.

Рассмотрим пример аналитического решения для участка трубопровода с тремя промежуточными насосными станциями. На трубопроводе длиной в 400 км построены три насосные станции. Расстояние между станциями 120, 180, 100 км. По трубопроводу перекачивают бензин плотностью 735 кг/м^3, вязкостью 0,6 сСт. Подпор перед первой станцией и перед пунктом приема равен 30 м. На насосных станциях установлены насосы с одинаковыми характеристиками. Причем на первых двух работают два последовательно соединенных насоса, а на третьей – лишь один. Внутренний диаметр трубопровода 514 мм.

Номинальному режиму работы соответствует расход 1080 м^3/ч. Сможем ли мы, изменяя частоты вращения роторов НПА, увеличить расход до 1200 м^3/ч, если минимальный подпор перед станцией 30 м, а максимальное давление после станции 5 МПа.

Получаем $x_1 + x_2 + x_3 = 3{,}98$. Поскольку x_3 больше или равно нулю, можем заменить $x_1 + x_2 \le 3{,}98$.

Условия согласования: $x_1 \le 2{,}02$; $x_1 \ge 0{,}92$; $x_1 + x_2 \le 1{,}95$; $x_1 + x \ge 2{,}5$; $x_1 + x_2 \le 2{,}09$; $x_1 + x_2 \ge 2{,}6$.

Следовательно, увеличить расход до 1200 м^3/ч невозможно, так как для того, чтобы подпор перед третьей станцией был не меньше 30 м, необходимо давление после второй станции больше 5 МПа.

Научный руководитель проф. *М.В.Лурье*