

УДК 621.671

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЕ ВРАЩЕНИЯ

Ключевые слова: насосы для магистральных нефтепроводов, КПД, напор, частота, поле насоса.

Для ряда применяемых на магистральных нефтепроводах насосов получены аналитические зависимости напора и коэффициента полезного действия от подачи. В статье определены также аналитические выражения для линий, ограничивающих поле насоса.

В настоящее время на магистральных нефтепроводах все более широкое применение находит регулирование режимов работы изменением частоты вращения ротора насосов. В связи с этим часто приходится определять параметры работы насоса при различных частотах вращения. Производители оборудования представляют поле (ГОСТ 17398-72) и характеристики насосов, как правило, в графической форме и только для одной или нескольких частот вращения. Это делает актуальной задачу аналитического представления характеристик насосов с целью упрощения и унификации процедур их пересчета на произвольную частоту вращения, а также определения необходимой частоты вращения для создания заданных значений подачи и напора. Для практического использования в статье приводятся параметры аналитического представления напорной характеристики и зависимости подачи – коэффициент полезного действия (КПД) для ряда используемых на трубопроводах ВСТО магистральных насосов.

Аналитическое представление поля насосов

При фиксированной частоте вращения каждая из характеристик насоса (подача – напор, подача – КПД и др.) представляет собой одну кривую в координатах подача – параметр. При разных частотах вращения можно построить семейство характеристик, исходя из законов подобия для центробежных насосов

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{n}{n_0}; \quad \frac{H(Q)}{H_0(Q_0)} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^2; \quad \eta(Q) = \eta_0(Q_0). \quad (1)$$

Е.В. Вязунов

к.т.н., с.н.с., главный специалист
отдела математического моделирования
ОАО «Гипротрубопровод»,
г. Москва
VyazunovEV@gtp.transneft.ru



С.В. Путин

ведущий инженер
службы методологии
оперативного управления транспортом
нефти и нефтепродуктов
центра управления транспорта
и товарно-коммерческих операций
ООО «НИИ ТНН»
г. Москва
PutinSV@gtp.transneft.ru



Здесь n , Q , H , η – частота вращения, подача, напор и КПД насоса, индекс 0 означает, что параметр (частота вращения, подача) или характеристика ($H_0(Q_0)$, $\eta_0(Q_0)$) относятся к некоторой «базовой» частоте n_0 , в качестве которой целесообразно принимать частоту вращения на оптимальном режиме (ГОСТ 17398-72) данного насоса. Подачу и напор на этом режиме будем называть оптимальными. Отсутствие индекса 0 означает, что функция или параметр относятся к частоте n , отличной от оптимальной частоты вращения n_0 .

Напорную характеристику центробежного насоса при фиксированной частоте вращения можно аппроксимировать полиномом степени L

$$H = \sum_{i=0}^L a_i Q^i, \quad (2)$$

где a_i – коэффициенты аппроксимации напорной характеристики при частоте вращения n_0 .

Применяя законы подобия (1) к выражению (2), получим напорную характеристику насоса при любой частоте вращения n , отличной от базовой частоты

$$H(Q, x) = \sum_{i=0}^L a_i Q^i x^{2-i}, \quad (3)$$

где $x = n / n_0$ – относительная частота вращения.

При использовании относительных переменных (частоты вращения, подачи, напора и КПД) вследствие законов подобия напор и КПД зависят только от относительной подачи

$$\left(\frac{Q}{Q_0}\right) = x,$$

что позволяет сравнивать характеристики различных насосов. Вид этих характеристик зависит от коэффициента быстроходности насосов [1, 2].

Располагая множеством измерений подачи и напора (замеров) при различных частотах вращения, можно найти коэффициенты a_i ($i = 0, L$) аппроксимации напорной характеристики так, чтобы сумма квадратов расчетных и измеренных

Табл. 1
Коэффициенты
аналитического
представления
характеристик
насосов

Насос	Коэффициент быстро- ходности ¹	a_0	$a_1 \cdot 10^2$	$a_2 \cdot 10^6$	$k_1 \cdot 10^4$	$k_2 \cdot 10^6$	b_0	$b_1 \cdot 10^4$	$b_2 \cdot 10^6$	m
		м	$\frac{ч}{м^2}$	$\frac{ч^2}{м^2}$	$\frac{ч^2}{м^5}$	$\frac{ч^2}{м^5}$	м	$\frac{ч}{м^2}$	$\frac{ч^2}{м^5}$	
Sulzer HPDM 600-610-1d/33	120	506,9	2,464	-4,262	1,145	3,755	220,5	-198,6	0,123	2,5
Sulzer HPDM 600-615-1d/27	99	457,7	3,263	-8,17	2,558	9,09	178,1	36,75	0,223	2,75
Sulzer HPDM 600-680-1d/36	131	670,6	0,4893	-1,195	35,81	0,7454	186,3	5,658	4,305	2,76
HM-10000/0,7-380a-2	162	393,2	0,2375	-2,792	0,169	4,226	-	-	-	2,81
HM-10000/0,7-380b-2	174	358,4	0,8097	-3,279	0,1616	3,811	-	-	-	2,88
HM-10000/0,7-380в-2	176	309,3	1,049	-2,943	0,1463	3,638	-	-	-	2,25
HM-10000/0,7-380г-2	188	296,9	0,9056	-2,769	0,1377	3,311	-	-	-	2,25
HM-10000/0,7-380e-2	195	283,7	0,324	-1,962	0,1258	3,128	-	-	-	2,16

напоров была минимальна (метод наименьших квадратов). Если аппроксимация выполняется с помощью многочлена второй степени, то метод наименьших квадратов с учетом (3) приводит к следующей системе уравнений, линейных относительно искомым коэффициентов аппроксимации

$$\left. \begin{aligned} a_0 \sum_{j=1}^M x_j^4 + a_1 \sum_{j=1}^M Q_j x_j^3 + a_2 \sum_{j=1}^M Q_j^2 x_j^2 &= \sum_{j=1}^M H_j x_j^2 \\ a_0 \sum_{j=1}^M x_j^3 Q_j + a_1 \sum_{j=1}^M x_j^2 Q_j^2 + a_2 \sum_{j=1}^M x_j Q_j^3 &= \sum_{j=1}^M H_j Q_j x_j \\ a_0 \sum_{j=1}^M x_j^2 Q_j^2 + a_1 \sum_{j=1}^M x_j Q_j^3 + a_2 \sum_{j=1}^M Q_j^4 &= \sum_{j=1}^M H_j Q_j^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где j – номер замера, M – число замеров.

Такой подход позволяет, используя полученные при различных частотах измерения подач и напоров, найти такие коэффициенты аппроксимации a_i (одинаковые для всех частот), что при расчете напоров по формуле (2) будут выполняться законы подобия. Если аппроксимировать зависимость напора от частоты формулой (3) по экспериментальным точкам для каждой частоты вращения отдельно, то в силу неизбежных ошибок измерения коэффициенты аппроксимации a_i получились бы различными для разных частот, т.е. не выполнялись бы законы подобия.

На основании семейств напорных характеристик, представленных производителями, были определены коэффициенты системы (4) и коэффициенты аппроксимации a_0, a_1, a_2 для ряда насосов, применяемых на магистральных нефтепроводах ВСТО (табл. 1). Стандартное (среднеквадратическое) отклонение расчетных значений напоров от измеренных (снятых с графиков) значений не превышает 1 % от «измеренного» напора (для насоса Sulzer HPDM 600-615-1d/27). Суммарная погрешность определения напора при построении напорной характеристики по результатам испытаний, в соответствии с ГОСТ 6134-2007, не должна превышать 1,5 %. Таким образом, погрешность аппроксимации напорной характеристики приводит к увеличению погрешности определения напора до 1,8 %.

Кроме того, были найдены аналитические выражения кривых, ограничивающих поле насоса на плоскости Q, H . Сверху и снизу это поле ограничено напорными характеристиками при максимальной и минимальной частоте вращения – кривые CE и AF соответственно (рис. 1). Минимальная и максимальная подачи насосов ограничиваются кривыми AC и EF соответственно. Эти кривые представляют собой параболы подобия, проходящие через начало координат и точки $H(Q_{\min}, n_0)$ и $H(Q_{\max}, n_0)$, где Q_{\min}, Q_{\max} – минимальная и максимальная допустимые подачи. Уравнения парабол подобия имеют вид $H = k_1 Q^2$ и $H = k_2 Q^2$. Значения коэффициентов k_1 и k_2 также приведены в табл. 1. Некоторые производители, например Sulzer, исключают из общего поля насоса область BCD (рис. 1), в которой допускается работа в течение ограниченного времени. Коэффициенты b_0, b_1, b_2 аппроксимации кривой BD параболой также приведены в табл. 1.

Аналитическое представление КПД насосов

Для сравнения характеристик подача – КПД разных насосов целесообразно использовать относительные параметры

$$x = \frac{n}{n_0}, \quad q = \frac{Q}{Q_0^*} \quad \text{и относительный КПД } K = \frac{\eta(Q)}{\eta(Q_0^*)}$$

где Q_0^* – оптимальная подача насоса. При выполнении законов подобия (1) значения K для всех частот ложатся на одну кривую в относительных координатах. Для насосов с одинаковыми коэффициентами быстроходности эти кривые совпадают. Это утверждение справедливо только в случае выполнения закона подобия для КПД (третье соотношение в (1)).

Однако на самом деле КПД насоса уменьшается с уменьшением частоты вращения по сравнению с оптимальной частотой. Например, у насосов Sulzer [2] при уменьшении частоты вращения до 40 % от оптимальной частоты КПД уменьшается на 1–2 %. На рис. 2 показаны максимальные значения КПД насоса при разной относительной частоте вращения x , взятые с графиков семейства характеристик насоса при разных частотах вращения.

С учетом этого обстоятельства в [3] в качестве относительной подачи и относительного КПД принимались значения

¹ Вычисляется для насосов HM по формуле $n_s = 3,65n \frac{Q^{0,5}}{H^{0,75}}$, где n – частота вращения, об/мин; Q – подача через один вход насоса, м³/с;

H – напор насоса, м; для насосов Sulzer HPDM – по формуле $n_s = 3,65n_q$, где n_q – коэффициент быстроходности, указанный в марке насоса (33, 27, 36).

$$q = \frac{Q}{Q^*(x)}, \quad K(q) = \frac{\eta(q)}{\eta_{\max}(x)}$$

где $Q^*(x)$ – подача вращающегося с частотой x насоса, при которой КПД принимает максимальное значение $\eta_{\max}(x)$.

Зависимость КПД от подачи не всегда имеет ярко выраженный максимум. Поэтому для более точного определения значений подач $Q^*(x)$ целесообразно аппроксимировать экспериментальные значения Q^* в соответствии с первым соотношением из системы (1) линейной зависимостью, проходящей через нулевую точку (рис. 3). Для показанного на рисунке примера отсутствуют данные о значениях КПД при оптимальной частоте вращения, следовательно, неизвестно и значение оптимальной подачи. Однако линейная аппроксимация экспериментальных данных позволила установить это значение $Q^*(1) = 5334,6 \text{ м}^3/\text{ч}$. Стандартное отклонение расчетных (в соответствии с аппроксимацией) подач от экспериментальных значений составило $23,4 \text{ м}^3/\text{ч}$, т.е. менее 0,5 % от оптимальной подачи, надежность вывода о линейной зависимости 0,9997.

Для зависимости относительного КПД от относительной подачи была предложена формула

$$K(q) = [1 - |1 - q|^m]^{\exp \frac{q}{m}}$$

Коэффициент m для каждой марки насоса определялся индивидуально методом наименьших квадратов. В табл. 1 приведены значения, полученные в результате обработки данных производителя для разных насосов. Стандартное отклонение расчетных значений КПД от значений, снятых с графиков, не превышает 1,5 % от максимального значения. Коэффициент полезного действия в зависимости от метода определения в соответствии с ГОСТ 6134-2007 определяется с погрешностью 2,9 или 3,2 %. В данном случае погрешность аппроксимации характеристики приводит к увеличению общей погрешности определения КПД до 3,3 и 3,5 % соответственно.

Окончательно КПД насоса в % или долях единицы при относительной подаче q и частоте вращения x определяется по формуле

$$\eta(q, x) = K(q)\eta_{\max}(x).$$

Если отсутствуют данные о КПД насоса при разных частотах или выявленное снижение показателя пренебрежимо мало по сравнению с погрешностью его определения, то в соответствии с третьим соотношением системы (1) $\eta_{\max}(x) = \eta_{\max}(1)$.

В соответствии с критерием ничтожной погрешности [4] снижение максимального КПД с уменьшением частоты можно считать пренебрежимо малым в рабочем диапазоне частоты, если оно не превышает 30 % от погрешности определения КПД.

Полученные в результате расчетов данные используются при расчетах стационарных и переходных процессов магистрального трубопровода с использованием на магистральных насосных станциях насосных агрегатов с частотным регулированием. Для других, не вошедших в таблицу насосов по изложенной методике можно найти все коэффициенты, определяющие характеристики и поле насоса.

Рис. 1

Поле насоса HPDM-600-615-1d/27

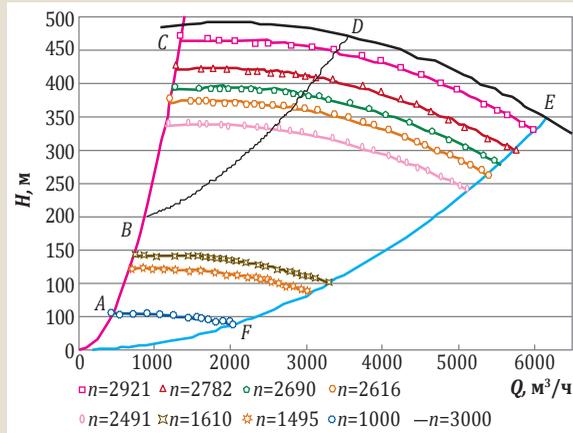


Рис. 2

Зависимость максимального КПД насоса HPDM-600-615-1d/27 от частоты вращения

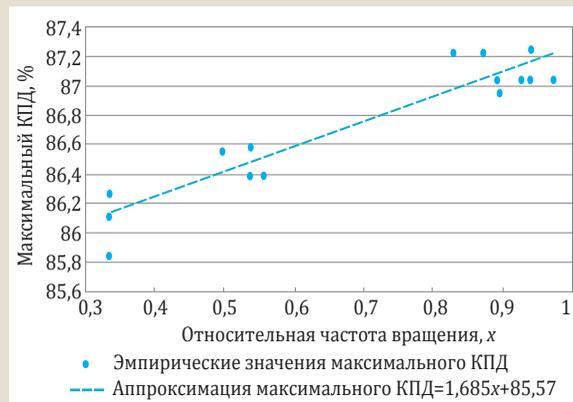


Рис. 3

Подача насоса HPDM 600-615-1d/27 при максимальном КПД



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов А. И. Центробежные и осевые насосы. М. : ГНТИ Машиностроительной литературы, 1960.
2. Sulzer centrifugal pump handbook. Second edition // Kidington. UK : Elsevier, 1998.
3. Вязунов Е. В. Характеристики центробежных насосов при переменной частоте вращения // Транспорт и хранение нефтепродуктов. М. : ЦНИИТЭнефтехим, 2007. № 6.
4. Маликов М. Ф. Основы метрологии. М. : Коммерприбор, 1949.