

УДК 62-529

А.В. Майстренко, А.А. Светлаков

## Косвенное измерение расхода жидкости, перекачиваемой насосными агрегатами

Обсуждаются результаты исследования методов косвенного измерения расхода перекачиваемой насосными агрегатами (НА) жидкости, основанных на использовании их напорных характеристик. Приведены результаты экспериментальных исследований косвенных методов, основанных на аппроксимации напорной характеристики НА алгебраическими полиномами 2-го и 3-го порядков, иллюстрирующие их работоспособность и пригодность для решения прикладных задач ретроспективного оценивания коэффициентов полиномов, аппроксимирующих напорные характеристики НА. Приведены относительные погрешности косвенного измерения расхода перекачиваемой жидкости с применением данных полиномов.

**Ключевые слова:** расходомер, насосный агрегат, косвенное измерение, полином.

Одним из необходимых условий эффективной эксплуатации современных трубопроводов, предназначенных для перекачки нефти, нефтепродуктов и других жидкостей насосными агрегатами (НА), является знание значений расхода  $Q$  перекачиваемой жидкости через заданные сечения трубопровода в тот или иной момент времени. Знание данных значений позволяет формулировать и решать целый ряд задач, связанных с построением математических моделей и численным моделированием различных технологических процессов и оборудования трубопроводов, а также управления данными процессами и оборудованием в реальном масштабе времени, и решать другие задачи.

Однако чрезмерно высокая стоимость расходомеров перекачиваемых жидкостей не позволяет оснастить реальные трубопроводы достаточным количеством данных приборов. Следствием этой причины является и то, что расходомеры устанавливаются только на определенных участках трубопроводов и на больших расстояниях друг от друга. Такое размещение расходомеров приводит к недостаточности информации о расходах перекачиваемой нефти и нефтепродуктов через различные участки трубопроводов. Кроме высокой стоимости современным расходомерам присущи и такие недостатки, как недостаточно высокая надежность и сложность их эксплуатации и т.п. Перечисленные недостатки расходомеров обуславливают актуальность задачи создания и исследований методов косвенного измерения расхода перекачиваемой жидкости НА и разработки аппаратно-программных устройств, реализующих данные методы. Создание подобных устройств и оснащение ими различных трубопроводов позволит повысить надежность и эффективность эксплуатации данных трубопроводов.

В предлагаемой работе обсуждаются некоторые результаты исследования методов косвенных измерений расхода перекачиваемой жидкости насосами, основанных на использовании их напорных характеристик. Существующая в настоящее время оснащенность НА достаточно надежными, дешевыми и простыми в эксплуатации манометрами и другими датчиками давления, позволяющими с высокой точностью измерять развиваемое ими давление, а также имеющиеся возможности построения мощностных характеристик данных агрегатов, достаточно адекватно описывающих зависимость развиваемого НА давления  $P$  от расхода  $Q$  перекачиваемой им жидкости, открывают широкие возможности для практической реализации рассматриваемого в работе метода косвенного измерения расхода жидкости, перекачиваемой НА.

Данный метод может найти применение в современных нефте- и газопроводах, в трубопроводных системах водоснабжения в ЖКХ и др., в качестве оценочного метода для измерения расхода перекачиваемой жидкости НА. Предлагаемый метод с достаточно высокой точностью позволит учитывать старение, износ, а также изменения реологических характеристик жидкости, перекачиваемой НА.

**Содержательная и математическая сущность задачи косвенного измерения расхода перекачиваемой жидкости насосными агрегатами.** Как известно из теории и практики технических измерений [1], косвенным измерением той или иной физической, химической, экономической и т.п. величины принято называть ее измерение или, что то же самое, определение ее численного значения, основанное на использовании известной функциональной зависимости между значениями дан-

ной величины и значениями некоторой другой величины, доступной для непосредственных измерений. При этом, как правило, предполагается, что используемая функциональная зависимость между косвенно измеряемой и непосредственно измеряемой величинами является взаимно однозначной, т.е. такой, что любому значению непосредственно измеряемой величины соответствует единственное значение косвенно измеряемой величины, и наоборот. В нашем случае непосредственно и косвенно измеряемыми величинами являются соответственно давление  $P$ , развиваемое НА, и расход  $Q$  жидкости перекачиваемой НА, а используемой при этом функциональной зависимостью между численными значениями данных величин является так называемая напорная характеристика НА или, что то же самое,  $(Q, P)$ -характеристика НА, описывающая зависимость развиваемого им давления  $P$  от расхода  $Q$  перекачиваемой жидкости. Отсюда видно, что содержательная сущность задачи косвенного измерения расхода перекачиваемой жидкости НА с использованием их напорных характеристик заключается в определении неизвестного численного значения расхода  $Q$  перекачиваемой НА жидкости, соответствующего измеренному и, таким образом, известному численному значению развиваемого им давления  $P$ , с использованием при этом его напорной характеристики.

С точки зрения математического анализа напорная характеристика НА является не чем иным, как некоторой функцией, определяемой равенством вида

$$P = P(Q). \quad (1)$$

При этом данная функция может быть задана как таблично, так и графически или аналитически, т.е. в виде той или иной формулы, связывающей значения  $P$  и  $Q$ . Вполне очевидно, что независимо от того, в каком из отмеченных выше виде задана  $(Q, P)$ -характеристика НА, она представляет зависимость давления  $P$ , развиваемого НА, от расхода  $Q$  перекачиваемой им жидкости. Очевидно также, что с математической точки зрения задача косвенного измерения расхода  $Q$  сводится к вычислению численного значения  $Q_0$  расхода  $Q$ , соответствующего заданному значению  $P_0$  развиваемого НА давления  $P$ . Как вытекает из (1), вычисление значения  $Q_0$ , в свою очередь, сводится к решению следующего уравнения:

$$P_0 = P(Q_0). \quad (2)$$

Для упрощения последующих рассмотрений и изложения их результатов всюду далее будем рассматривать конкретный НА типа Д2500-62, широко используемой в различных отечественных трубопроводах [2]. Графическое представление напорной характеристик данного НА приведен на рис. 1, все зависимости на котором получены в заводских условиях, посредством реальных испытаний.  $(Q, P)$ -характеристика на рис. 1 в явном виде не представлена, но ее легко получить, пересчитав по формуле  $P_i = H_i \times \rho g$ , где  $H$  – напор;  $\rho$  – плотность перекачиваемой жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения.

Как показывает выполненный нами анализ аналогичный вид имеют и графики  $(Q, P)$ -характеристик всех других НА, выпускаемых отечественной промышленностью и используемых для техно-

нологического оснащения отечественных трубопроводов. Поэтому излагаемые ниже результаты оказываются достаточно универсальными и легко распространяются на другие типы данных НА.

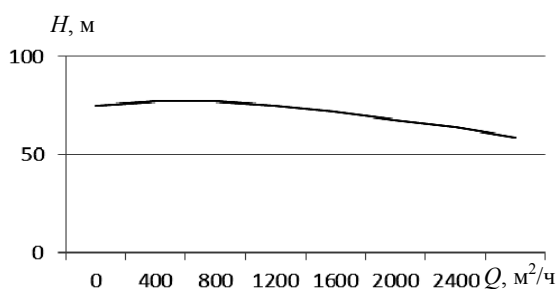


Рис. 1. Графическое представление мощностной и других характеристик НА типа Д2500-62

Анализируя приведенный график, нетрудно обнаружить, что  $(Q, P)$ -характеристика НА является непрерывной, достаточно гладкой и монотонно убывающей с увеличением  $Q$  функцией, и эти особенности данных характеристик имеют место на всем интервале  $I_Q$  значений расхода  $Q$  перекачиваемой жидкости. С точки зрения математического анализа и теории аппроксимации вещественных функций одного вещественного аргумента [3] данные особенности  $(Q, P)$ -характеристики НА означают, что ее можно сколь угодно точно аппроксимировать многими хорошо изученными и широко используемыми для аппроксимации вещественных функций одного вещественного аргумента, заданных таблично или графически, как это имеет место в нашем случае, простейшими функциями.

Наиболее популярными примерами таких функций являются алгебраические и тригонометрические полиномы, а также экспоненциальными полиномы и дробно-рациональные функции и др.

Как известно из математического анализа [3], из упомянутых выше функций наиболее просто устроенными и, соответственно, наиболее доступными для вычислений и аналитических исследований, а также для различных практических приложений являются алгебраические полиномы. Как показывают результаты выполненных нами численных экспериментов, применение алгебраических полиномов второго порядка позволяет получить вполне приемлемую точность аппроксимации  $(Q, P)$ -характеристик. Отсюда вытекает, что данную характеристику НА можно достаточно обоснованно представить следующим равенством:

$$P(Q) = c_0 + c_1 \times Q + c_2 \times Q^2, \quad (3)$$

где  $c_0$ ,  $c_1$  и  $c_2$  – постоянные коэффициенты, не зависящие от расхода  $Q$  перекачиваемой НА жидкости.

Некоторые количественные оценки погрешностей и точности аппроксимации  $(Q, P)$ -характеристики НА типа Д2500-62 алгебраическими полиномами вида (3), подтверждающие обоснованность данного заключения, рассматриваются ниже.

**Анализ возможных подходов к решению задач косвенного измерения расхода перекачиваемой жидкости НА с использованием его  $(Q, P)$ -характеристики.** Рассмотрим два подхода к решению данной задачи, основанных на различных способах задания  $(Q, P)$ -характеристик НА.

Подход, основанный на использовании  $(Q, P)$ -характеристики НА, приведен в табл. 1, где приняты следующие условные обозначения:

$j$  – так называемые ранги значений  $Q_j$  расхода  $Q$ , упорядоченных по их возрастанию или, что то же самое, порядковые номера значений  $Q_j$  расхода  $Q$ , присвоенные им в упорядоченной по возрастанию совокупности значений расхода жидкости  $Q$ , перекачиваемой НА;

$m$  – число имеющихся значений  $Q_j$  расхода жидкости через НА, удовлетворяющее неравенствам  $3 < m < \infty$ ;

$Q_j$  – значение расхода  $Q$ , занимаемое  $j$ -е место в упорядоченной по возрастанию совокупности значений расхода  $Q$ ;

$P_j$  – значение развиваемого НА давления  $P$ , соответствующее  $j$ -му значению  $Q_j$  расхода  $Q$ .

Поиск значения  $Q_0$  расхода  $Q$ , соответствующего значению  $P_0$  развиваемого НА давления  $P$ , можно осуществить многими хорошо известными в настоящее время методами решения подобных задач, например, такими как: 1) метод дихотомии; 2) метод чисел Фибоначчи; 3) метод золотого сечения; 4) метод стохастической аппроксимации и др., что, очевидно, является достоинством данного подхода.

Недостатком данного подхода является то, что нужно выделять значительные объемы памяти для хранения табл. 1. Так как она содержит вещественные числа и под одно такое число надо выделить от 4 до 8 байтов памяти, а под таблицу в целом нужно выделить  $4 \times 2 \times m$  или  $8 \times 2 \times m$  байтов памяти. При больших значениях  $m$  ее размеры оказываются весьма значительными. Современные микропроцессоры (МП) и микроконтроллеры (МК) обладают большими объемами памяти и позволяют хранить и обрабатывать данные в больших объемах. Однако их использование приводит к существенному повышению стоимости устройства, разрабатываемого на их основе, что ограничивает, а в ряде случаев исключает возможность их применения. Кроме того, при хранении не одной таблицы вида 1, а десятков, сотен и более, что при создании реальных автоматизированных систем управления, как правило, и имеет место, у многих МП и МК оказывается недостаточно памяти. Данную проблему, очевидно, можно решить, подключив внешние периферийные устройства памяти, такие как FLASH-карты или HDD. Однако очевидно также, что подключение данных устройств приведет к ухудшению динамических свойств и прежде всего быстродействия, повышению стоимости и снижению надежности создаваемого аппаратно-программного комплекса косвенного измерения расхода жидкости, перекачиваемой НА.

**Подход, основанный на использовании напорной характеристики НА, заданной аналитически.** Как отмечено выше, напорную характеристику НА можно со сколь угодно малой погрешностью аппроксимировать многими известными в настоящее время полиномами и другими достаточно просто устроенными функциями. Однако для обеспечения наибольшей экономичности алгоритмов косвенного измерения расхода, перекачиваемой НА жидкости, как по объемам вычислений, так и по объемам памяти, необходимых для реализации данных алгоритмов с применением средств вычислительной техники, наиболее целесообразно использовать алгебраические полиномы вида (3), используя для определения их коэффициентов  $c_0$ ,  $c_1$  и  $c_2$  какой-либо известный метод оценивания [4] и табл. 1. Как непосредственно видно из (3), при использовании любого из полиномов

Таблица 1  
Напорная характеристика НА

$j$	$Q_j$	$P_j$
1	$Q_1$	$P_1$
2	$Q_2$	$P_2$
...	...	...
$m$	$Q_m$	$P_m$

вычисление значения  $Q_0$ , соответствующего заданному значению  $P_0$ , сводится к решению алгебраического уравнения 2-го порядка, корни которого легко вычисляются аналитически.

**Некоторые результаты численных экспериментов.** Целью экспериментов являлись аппроксимация  $(Q, P)$ -характеристики НА типа Д2500-62 алгебраическими полиномами различных порядков и оценка их точностных характеристик.

Вычисление коэффициентов полиномов осуществлялось методом оценивания неизвестных величин, основанным на использовании псевдообратных матриц [4, 5]. При этом в качестве необходимых для его применения исходных данных использовались численные значения расхода  $Q$ , и развиваемого давления  $P$ , полученные в результате оцифровки графиков  $(Q, P)$ -характеристики НА, представленной на рис. 1. Оцифровка выполнялась с шагом дискретизации  $\Delta Q = 30 \text{ м}^3/\text{ч}$ . В результате было получено 100 точек  $(Q_j, P_j)$ ,  $i = \overline{1, 100}$ .

Таблица 2

Порядок полинома	Коэффициенты полинома				$S$ , Па	$\delta$ , %
	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$		
1	8,038e+5	-81,157	0,0	0,0	3,257e+5	4,299
2	7,337e+5	60,408	-0,0472	0,0	3,271e+4	0,391
3	7,389e+5	39,015	-0,0293	-3,973e-6	2,511e+4	0,314

В результате решения задачи аппроксимации численных значений  $Q_j$  и  $P_j$  алгебраическими полиномами 1-, 2- и 3-го порядков были получены численные значения коэффициентов полиномов, приведенные в табл. 2. В этой же таблице приведены численные значения средней квадратической ошибки  $S$  и средней относительной ошибки  $\delta$ .

Здесь  $S$  – средняя квадратичная ошибка, а  $\delta$  – средняя относительная ошибка аппроксимации  $(Q, P)$ -характеристики НА.

Очевидно, что полином 1-го порядка не описывает напорную характеристику с приемлемой для практических приложений точностью. Использовать данный полином для решения рассматриваемой задачи косвенного измерения расхода  $Q$  перекачиваемой НА жидкости нецелесообразно, так как вычисленное значение  $Q_0$  расхода  $Q$  заметно отличается от истинного значения  $Q_{\text{ист}}$  расхода  $Q$ .

Результаты аппроксимации напорной характеристики НА полиномом 3-го порядка представлены графически на рис. 2, аналогичные результаты получены и для полинома 2-го порядка но здесь они не приводятся. Анализируя данные результаты, можно видеть, что полиномы 2-го и 3-го порядков аппроксимируют напорную характеристику НА с достаточно с высокой точностью. Как можно увидеть из табл. 2, средняя относительная ошибка аппроксимации составляет меньше 0,5%.

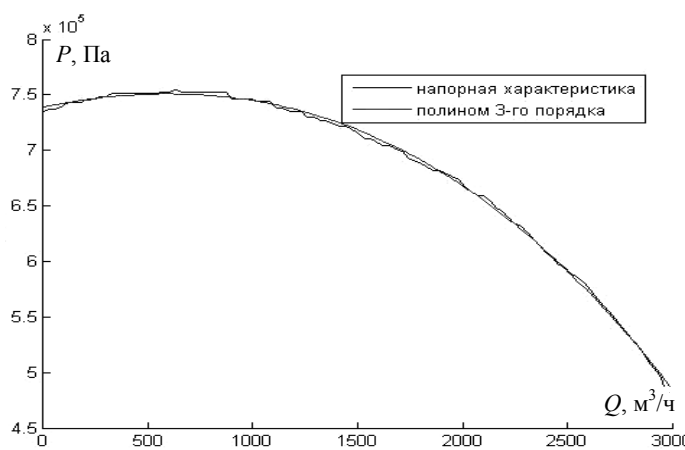


Рис. 2. Исходная функция и аппроксимирующий полином третьего порядка

Вычислим значения  $Q_0$  расхода  $Q$ , используя полиномы 2-го и 3-го порядков, коэффициенты которых были получены в результате аппроксимации и представлены в табл. 2.

В данном эксперименте рассматривался участок рабочей части напорной характеристики НА типа Д2500-62 от 2000 до 3000  $\text{м}^3/\text{ч}$ . Относительная погрешность при использовании полинома 2-го порядка не превышает 2,5%. На рис. 3 представлен график зависимости относительной ошибки  $\delta$  от истинного значения  $Q_{\text{ист}}$  расхода  $Q$ , полученной по одной выборке при использовании полинома 3-го порядка.

Как показывают результаты выполненных расчетов, при вычислении расхода  $Q$ , с использованием полинома 3-го порядка относительная погрешность не превышает 1,3%, это можно увидеть из рис. 3.

**Заключение.** Резюмируя изложенное в предшествующих разделах, отметим три основных результата. 1. Предложен и исследован метод косвенного измерения расхода перекачиваемой жидкости НА, основанный на аппроксимации  $(Q, P)$ -характеристики НА алгебраическими полиномами 1-, 2- и 3-го порядков.

2. Предлагаемый метод позволяет с достаточно высокой точностью аппроксимировать напорную характеристику НА, что, в свою очередь, позволяет формулировать и решать не только задачи косвенного измерения расхода перекачиваемой жидкости, но и задачи, связанные с построением математических моделей и численным моделированием технологических процессов и оборудования трубопроводов.

3. Результаты численного моделирования предложенного метода наглядно иллюстрируют его работоспособность и пригодность для решения прикладных задач в ретроспективном режиме, что открывает широкие перспективы для его применения в проектировании автоматических и автоматизированных систем управления трубопроводами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №13-08-00092.

#### Литература

1. Эрастов В.Е. Метрология, стандартизация и сертификация: учеб. пособие. – Томск: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 266 с.
2. Жабо В.В. Гидравлика и насосы. – 2-е изд., перераб.: учеб. пособие / В.В. Жабо, В.В. Уваров. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 328 с.
3. Фихтенгольц Г.М. Основы математического анализа: учеб. для вузов. – Ч. 1. – СПб.: Лань, 2001. – 440 с.
4. Светлаков А.А. Обобщенные обратные матрицы: некоторые вопросы теории и применения в задачах автоматизации управления процессами. – Томск: Изд-во НТЛ, 2003. – 388 с.
5. Карелин А.Е. Обобщенные обратные матрицы и их применение в задачах автоматизации технологических процессов и производств: учеб. пособие / А.Е. Карелин, А.В. Майстренко, А.А. Светлаков. – Томск: Том. гос. ун-т. систем упр. и радиоэлектроники, 2010. – 147 с.

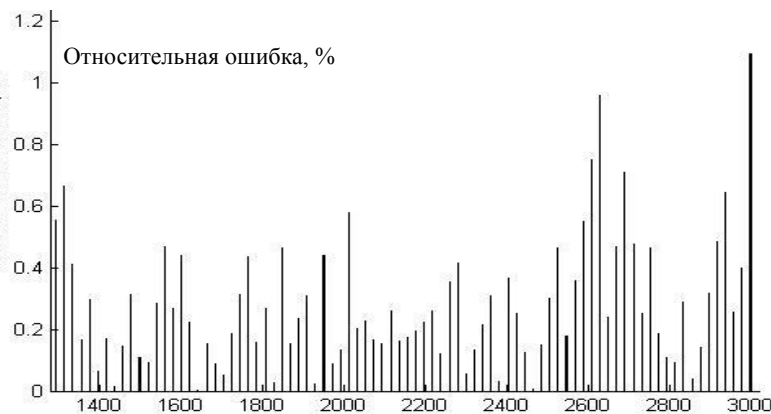


Рис. 3. Зависимость относительной погрешности от истинного значения расхода, при использовании полинома 3-го порядка

#### Майстренко Андрей Васильевич

Канд. техн. наук, доцент каф. ЭСАУ  
Тел.: +7 (382-2) 90-01-93  
Эл. почта: maestro67@mail.ru

#### Светлаков Анатолий Антонович

Д-р техн. наук, профессор каф. ЭСАУ  
Тел.: +7 (382-2) 90-01-93  
Эл. почта: iit@tusur.ru

Maystrenko A.V., Svetlakov A.A.

#### The indirect measurement of oil flow rate, delivered with a pump unit

The paper discusses the results of a study of methods of indirect measurement of the flow of the pumped pumping units (PU) of the liquid based on the use of their pressure characteristics. The experimental results of indirect methods are given based on the approximation of the pressure characteristics on algebraic polynomials of 2nd and 3rd order to illustrate their efficiency and suitability for applications retrospective estimation of the coefficients of polynomials approximating pressure characteristics on. The relative error of indirect measurement of the flow of the pumped liquid using these polynomials is given.

**Keywords:** flowmeter, pumping unit, indirect measurement, a polynomial.