

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 62.529

DOI: 10.17212/2782-2001-2025-4-105-122

Методы и алгоритмы косвенного измерения расхода нефтепродуктов через насосные агрегаты и их применение в автоматизированных системах управления трубопроводами*

А.В. МАЙСТРЕНКО

*РФ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
maestro67@mail.ru*

В представленной работе рассматриваются формулировка проблемы и синтез новых методов и алгоритмов для непрямого определения расхода перекачиваемых нефтепродуктов с использованием напорных характеристик насосных станций. Предложенные алгоритмы основаны на трех инновационных подходах к решению этой задачи. Проведен анализ и обоснована возможность косвенного измерения потока нефти в системе последовательно соединенных насосных агрегатов. Представлены результаты опытных исследований разработанных методов и алгоритмов измерения пропускной способности насосов. Развитие микроэлектроники и измерительной техники существенно расширяет возможности оснащения трубопроводов современными расходомерами, однако их высокая цена препятствует повсеместному внедрению на существующих трубопроводах. В связи с этим расходомеры устанавливаются выборочно, на значительном удалении друг от друга, что приводит к недостатку информации о потоках перекачиваемых нефтепродуктов по всей протяженности трубопроводной системы. Такое размещение расходомеров неизбежно приводит к недостаточности информации о расходах перекачиваемых нефтепродуктов через различные участки трубопроводов. Для эффективной работы насосных станций и трубопроводного транспорта в целом необходимо точное знание объемов перекачиваемых нефтепродуктов через отдельные насосы или участки трубопровода за определенный временной интервал [1, 2]. Разработка современных систем управления технологическими процессами трубопроводов в режиме реального времени требует решения комплекса задач, связанных с математическим и численным моделированием этих процессов. Представлены результаты вычислительных экспериментов с использованием синтезированных методов и алгоритмов, основанных на аппроксимации напорной характеристики насосного агрегата алгебраическими полиномами, демонстрирующие их преимущества при оценке коэффициентов данных полиномов [3].

Ключевые слова: автоматизация, алгоритм, алгебраический полином, аппроксимация, косвенные измерения, магистральный нефтепровод, математическое моделирование, метод, напорная характеристика, насосный агрегат, системы управления, технологический процесс, функция

* Статья получена 19 сентября 2025 г.

ВВЕДЕНИЕ

Методы косвенного измерения расхода нефтепродуктов с использованием напорных характеристик насосных агрегатов (НА) применимы не только к нефтепродуктам, но и к различным жидким и газообразным средам, транспортируемым по трубопроводным системам. В области технических измерений косвенным измерением величины называют процесс определения ее значения, основанный на использовании известной взаимосвязи с другими параметрами, которые можно измерить с помощью непосредственных измерений. Согласно принципам математического анализа [4], каждому значению непосредственно измеряемой величины соответствует только одно значение косвенно определяемой величины, и наоборот. Эта однозначность является ключевым условием для корректного применения методов косвенных измерений [5]. Синтезированные методы способны учитывать старение, износ и изменения реологических характеристик жидкости, перекачиваемой НА [6]. В работе рассматриваются и анализируются возможности и подходы к решению задач косвенного измерения расхода нефтепродуктов как через отдельный НА, так и через комбинацию НА, включенных последовательно, с использованием их напорных характеристик, а также приведены результаты численных экспериментов, иллюстрирующие работоспособность и эффективность синтезированных методов и алгоритмов. Эти методы могут найти применение в современных нефте- и газопроводах, в трубопроводных системах водоснабжения в ЖКХ и других сферах в качестве оценочного метода для измерения расхода перекачиваемой жидкости НА.

В первом разделе статьи проводится анализ концептуальной и математической сторон задачи, связанной с косвенным определением объема перекачиваемых нефтепродуктов. Во втором разделе представлен анализ возможностей косвенного измерения расхода нефти через НА с учетом его напорной характеристики. В третьем разделе приведен анализ подходов к решению задач косвенного измерения расхода нефтепродуктов через НА с учетом его напорной характеристики. В четвертом разделе работы приведен анализ возможностей косвенного измерения расхода нефти через комбинацию НА, включенных последовательно. Подобные системы широко распространены в практике эксплуатации трубопроводов и обладают существенной прикладной ценностью. В пятом разделе представлены результаты экспериментальных исследований разработанных методов и алгоритмов.

1. ЗАДАЧА КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА НЕФТЕПРОДУКТОВ, ПЕРЕКАЧИВАЕМЫХ НАСОСНЫМИ АГРЕГАТАМИ

В рамках рассматриваемой задачи к прямым и косвенным измерениям относятся напор H , развиваемый НА, и расход перекачиваемых нефтепродуктов Q . Зависимость между этими параметрами представляет собой напорную характеристику НА, которая отражает связь между напором H и расходом Q перекачиваемых через НА нефтепродуктов [7–11]. Суть решения задачи косвенного определения расхода нефтепродуктов с использованием напорных

характеристик НА состоит в установлении неизвестного значения расхода Q , соответствующего фиксированному значению напора H , создаваемого НА.

Учитывая то, что напорная характеристика НА является некоторой функцией вида

$$H = H(Q), \quad (1)$$

задача сводится к вычислению численного значения Q_0 расхода Q , соответствующего заданному значению H_0 развиваемого НА напора H , а вычисление значения Q_0 сводится к решению уравнения

$$H_0 = H(Q_0) \quad (2)$$

в соответствии с какими-либо вычислительными алгоритмами. Эти алгоритмы будут детально рассмотрены далее. Необходимо подчеркнуть важность решения обсуждаемой задачи в рамках автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) перекачки нефтепродуктов по реально функционирующим магистральным нефтепроводам (МН) и актуальности ее практического решения в рамках подобных систем управления.

2. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАПОРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАСОСНОГО АГРЕГАТА

При рассмотрении содержательной и математической сущности задачи косвенного измерения расхода нефтепродуктов через НА отмечены следующие необходимые и достаточные исходные данные для ее решения:

1) измеренные значения напора H , развиваемого НА, используемым для косвенного измерения расхода нефти через него;

2) известная напорная характеристика $H = H(Q)$ данного НА, описывающая функциональную зависимость развиваемого напора H от расхода Q перекачиваемых нефтепродуктов.

На входе и выходе каждого НА установлены аналоговые датчики давления, обеспечивающие измерение значений давления на входе и выходе НА в любой момент времени. Это обстоятельство позволяет сделать следующие выводы:

1) в любой момент времени t имеются значения давления на входе и выходе НА $P_{\text{вх}}(t)$ и $P_{\text{вых}}(t)$, соответственно;

2) значения $P_{\text{вх}}(t)$ и $P_{\text{вых}}(t)$ позволяют в любой момент времени t вычислить их разность $P(t)$ в соответствии с простейшим равенством вида

$$P(t) = P_{\text{вых}}(t) - P_{\text{вх}}(t). \quad (3)$$

Как известно из теории насосов и практики их применения, эта разность давлений является не чем иным, как давлением, развиваемым НА в момент времени t .

Отмеченные выше факты позволяют заключить, что развиваемое напорным агрегатом давление $P(t)$ в любой момент времени t известно и его можно использовать для реализации дальнейших целей, в том числе и для решения задачи косвенного измерения расхода Q нефти через НА и делать это в любой момент времени t ; также известен и напор H , развиваемый НА. Как известно из гидравлики и гидромеханики [5], между давлением и напором имеет место взаимно однозначная функциональная зависимость, и эта зависимость описывается равенствами вида

$$\text{а) } H = P / \rho \quad \text{и} \quad \text{б) } P = H\rho, \quad (4)$$

где H – развиваемый напорным агрегатом напор (м); P – развиваемое напорным агрегатом давление (кг/см²); ρ – плотность перекачиваемой нефти (кг/см³).

Анализируя приведенные равенства, можно видеть, что первое из них позволяет вычислить значение напора H при любом заданном значении P . Однако сделать это можно лишь в случае, когда наряду со значением P известно также значение плотности ρ перекачиваемой нефти. Если же значение ρ неизвестно, то вычислить интересующее значение напора H в соответствии с равенством (3) оказывается невозможно. Еще одним затруднением, возникающим при использовании равенства (3) для вычисления напора H , является то, что в условиях эксплуатации реальных МН значение плотности ρ перекачиваемой нефти оказывается известным лишь приближенно. Отсюда вытекает, что значение H , вычисленное в соответствии с равенством (1), также будет приближенным. При этом ошибка его вычисления оказывается прямо пропорциональной ошибке задания плотности ρ . Для решения рассматриваемой задачи косвенного измерения расхода Q нефтепродуктов через НА с использованием его напорной характеристики учет развиваемого им напора H не является необходимым условием, и для решения задачи оказывается вполне возможным воспользоваться известным значением развиваемого им давления P .

Как известно из теории и практики эксплуатации НА [6, 12], используемых для перекачки нефтепродуктов по трубопроводам, напорная характеристика НА представляет собой функциональную зависимость развиваемого им напора H от расхода Q перекачиваемых через него нефтепродуктов и содержит в себе информацию, необходимую для решения задач эксплуатации МН. На рис. 1 приведена типовая графическая характеристика НА типа НМ.

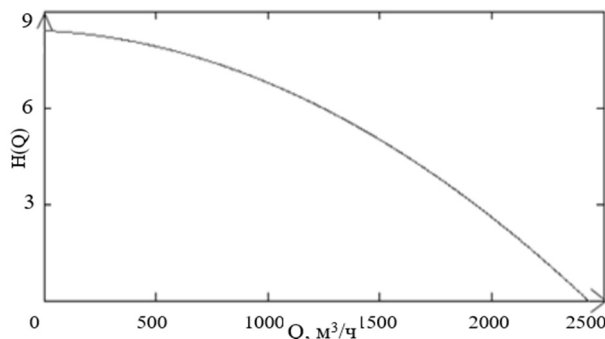


Рис. 1. Напорная характеристики НА типа НМ

Fig. 1. PU pressure characteristics of the NM type

Анализ представленной графической зависимости демонстрирует, что напорная характеристика НА обладает свойствами гладкости, непрерывности и монотонности убывания. Опираясь на принципы математического анализа и теорию приближений вещественных функций [4, 13], можно утверждать, что указанные свойства напорной характеристики НА позволяют с высокой степенью точности аппроксимировать ее посредством различных функций, таких как алгебраические или экспоненциальные полиномы, рациональные функции и прочие.

Из математического анализа [4, 14] известно, что наиболее доступными для вычислений и аналитических исследований являются алгебраические полиномы. Учитывая то, что решение задачи должно осуществляться в рамках АСУ ТП перекачки нефтепродуктов по МН, функционирующим в реальном времени, представляется оправданным при решении задач косвенного измерения расхода Q через НА ориентироваться на использование аппроксимаций напорных характеристик НА алгебраическими полиномами. Их применение позволяет создать наиболее экономичное алгоритмическое обеспечение по объемам вычисления и оперативной памяти вычислительного устройства (компьютера, контроллера и т. п.), необходимым для его реализации в рамках АСУ ТП.

Результаты численных экспериментов оценки погрешностей аппроксимации напорных характеристик НА алгебраическими полиномами показывают, что требуемая точность аппроксимации достигается с использованием полиномов второго порядка. Считается, что напорная характеристика $H = H(Q)$ любого НА может быть представлена алгебраическим полиномом 2-го порядка вида

$$H(Q) = c'_0 + c'_1 Q + c'_2 Q^2, \quad (5)$$

где c'_0 , c'_1 , c'_2 – постоянные коэффициенты, не зависящие от расхода Q .

Умножив обе части равенства (5) на плотность ρ перекачиваемой нефти и учитывая функциональную зависимость между напором H и давлением P , представленную соотношениями (4), видно, что полученное равенство также определяет алгебраический полином 2-го порядка, эквивалентный полиному (5) и имеющий вид

$$P(Q) = c_0 + c_1 Q + c_2 Q^2. \quad (6)$$

Коэффициенты c_0 , c_1 и c_2 этого полинома не зависят от расхода Q и связаны с коэффициентами c'_0 , c'_1 и c'_2 полинома (5) равенствами вида

$$c_i = c'_i \rho, \quad (7)$$

где $i = \overline{0, 2}$.

Поскольку плотность ρ перекачиваемой нефти отлична от нуля и является строго положительной величиной, то эти равенства можно обратить и получить обратные им равенства, имеющие вид

$$c'_i = c_i \rho^{-1}, \quad (8)$$

где $i = \overline{0, 2}$.

Таким образом, получается две совокупности равенств, описывающих взаимно-однозначное соответствие между коэффициентами полиномов (5) и (6) и позволяющих по заданной совокупности одной из них (например, совокупности коэффициентов c_0 , c_1 и c_2) вычислить коэффициенты c'_0 , c'_1 и c'_2 , и наоборот. Учитывая, что любой алгебраический полином однозначно определяется набором его коэффициентов, можно видеть, что между полиномами (5) и (6) также имеется взаимно-однозначное соответствие, и при любой плотности ρ перекачиваемой нефти это соответствие описывается равенствами

$$\text{а) } P(Q) = \rho H(Q) \quad \text{и} \quad \text{б) } H(Q) = \rho^{-1} P(Q).$$

С точки зрения рассматриваемой задачи это соответствие является важным обстоятельством, позволяющим видеть, что значение расхода Q_0 , вычисленное с использованием полинома (5) и какого-либо заданного значения H_0 напора H , развиваемого НА, оказывается всегда равным значению Q_0 расхода Q , вычисленному с использованием полинома (4), и значения P_0 давления P , развиваемого НА, удовлетворяющего равенству (4б).

Учитывая отмеченное выше обстоятельство, а также отсутствие измеренных значений развиваемого НА напора H и наличие измерений давления P , развиваемого НА, нетрудно видеть, что при решении задачи косвенного измерения расхода Q через НА наиболее рационально использовать не его напорную характеристику $H = H(Q)$, определяемую равенством (3), а полином $P = P(Q)$, определяемый равенством (6), используя при этом измеренные значения развиваемого им давления P . Этот полином, как и полином (5), будет называться напорной характеристикой НА. Очевидно, что такое словопотребление не вполне корректно, так как развиваемый НА напор H непосредственно не фигурирует в данном полиноме. Однако в данном случае оно вполне уместно, поскольку, во-первых, не приводит к каким-либо недопониманиям и разночтениям и, во-вторых, так как между давлением и напором, развиваемыми НА, имеет место взаимно-однозначная линейная зависимость, то косвенным образом оно характеризует и напор развиваемого НА. Вполне очевидно, что было бы более корректным назвать этот полином (Q, P) характеристикой НА.

Первой из причин актуальности косвенного измерения расхода нефтепродуктов является необходимость знания расхода через различные участки МН и его оборудования. Как показывает практика эксплуатации МН и накопленный опыт создания и внедрения АСУ ТП перекачки нефтепродуктов по МН, знание расхода перекачиваемой нефти через НА, нефтеперекачивающую станцию (НПС) или линейный участок (ЛУ) в различные моменты или периоды времени является необходимым условием для решения задач синтеза математических моделей и моделирования технологических процессов и оборудования МН и управления ими в режиме реального времени. Очевидно, что без знания расхода перекачиваемой нефти невозможно построить как статические, так и динамические модели, описывающие зависимости потерь давления на гидравлических сопротивлениях ЛУ, дроссельных заслонок, задвижек и другого технологического оборудования МН от расхода Q перекачиваемых нефтепродуктов по МН. Без наличия математических моделей, в которых

фигурируют значения расхода, невозможно формулировать и решать такие задачи управления процессами перекачки нефтепродуктов по МН, как выбор оптимальных режимов реализации этих процессов, расчет гидроуклонов, обнаружение утечек из трубопроводов; рассчитывать суммарные объемы нефтепродуктов, перекачиваемых через тот или иной участок МН или НПС, а также МН в целом за заданный период времени.

Второй причиной актуальности задачи косвенного измерения расхода нефти через НА и другие участки МН является чрезмерно высокая стоимость расходомеров нефти [15–18], а также их недостаточно высокая надежность и сложность эксплуатации в условиях реально действующих МН. На нефтепроводах используют разные типы расходомеров, которые измеряют объемный или массовый расход нефтепродуктов. Среди них ультразвуковые, турбинные и кориолисовые расходомеры. Стоимость импортных расходомеров, к примеру, от компании Panametrics начинается от нескольких сотен тысяч рублей и в зависимости от диаметра и типа может превышать миллион рублей. Расходомеры отечественного производства дешевле в среднем в 2–4 раза, но, учитывая их необходимое количество, итоговая стоимость автоматизации получается весьма существенной. Следствием перечисленных факторов является низкая оснащенность МН расходомерами и ее очевидная недостаточность для решения перечисленных выше задач управления процессами перекачки нефти по МН и их автоматизации.

3. ТРИ СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА НЕФТЕПРОДУКТОВ МЕТОДОМ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Этот раздел посвящен рассмотрению и подробному разбору трех различных методов, применяемых для решения поставленной задачи.

Первый способ базируется на применении напорной характеристики НА, представленной в табличной форме (табл. 1). Аналогичные таблицы доступны для каждого типа НА.

Таблица 1

Table 1

Напорная характеристика НА

PU head-capacity curve

I	Q_i	P_i
1	Q_1	P_1
2	Q_2	P_2
...	...	...
m	Q_m	P_m

В табл. 1 используются следующие условные знаки и сокращения:

i – порядковые номера значений Q_i расхода Q нефтепродуктов, перекачиваемых НА;

m – число значений Q_i расхода нефтепродуктов, удовлетворяющее неравенствам $2 \leq m < \infty$;

Q_i – значение расхода Q , занимаемое i -е место в упорядоченной по возрастанию совокупности значений расхода Q ;

P_i – значение давления P , соответствующее i -му значению Q_i расхода.

Как вытекает из приведенного выше комментария условных обозначений, принятых в табл. 1, значения Q_i в данном случае удовлетворяют неравенствам вида

$$Q_1 < Q_2 < Q_3 < \dots < Q_{m-1} < Q_m. \quad (10)$$

Учитывая монотонно убывающий характер зависимости значений развиваемого НА давления P , можно видеть, что значения P_i удовлетворяют неравенствам

$$P_1 > P_2 > P_3 > \dots > P_{m-1} > P_m. \quad (11)$$

Косвенное измерение расхода Q через НА заключается в нахождении величины расхода $Q_{\text{изм}}$, соответствующего измеренному значению $P_{\text{изм}}$ давления P , создаваемого напорным агрегатом. Для нахождения искомого значения Q применяются различные методы решения подобных задач: 1) метод Ньютона, 2) использование чисел Фибоначчи, 3) метод секущих и другие подходы.

Подход, основанный на использовании напорной характеристики НА, представленной в аналитической форме. Как уже упоминалось, напорную характеристику любого НА можно приближенно описать с помощью различных полиномов, при этом полученная аппроксимирующая функция будет являться аналитическим заданием напорной характеристики НА, наиболее целесообразно при этом использовать алгебраические полиномы 2-го порядка, определяемые равенством (6).

При использовании этих полиномов обеспечивается экономичность алгоритмов косвенного измерения расхода нефти, так как при любом значении P_0 давления P , развиваемого НА, косвенное измерение соответствующего ему значения Q_0 сводится к решению алгебраического уравнения 2-го порядка вида

$$c_2 Q_0^2 + c_1 Q_0 + (c_0 - P_0) = 0. \quad (12)$$

Уравнение (12) имеет два решения или, что то же самое, корни – Q_{01} и Q_{02} , и эти корни вычисляются в соответствии с равенствами вида

$$Q_{01} = \left[-c_1 + \sqrt{c_1^2 - 4c_2(c_0 - P_0)} \right] / 2c_2; \quad (13)$$

$$Q_{02} = \left[-c_1 - \sqrt{c_1^2 - 4c_2(c_0 - P_0)} \right] / 2c_2. \quad (14)$$

Анализируя равенства (13) и (14), можно сделать следующие выводы.

1. Существование и количество корней уравнений (12) здесь вполне однозначно определяется его дискриминантом Δ , вычисляемым согласно равенству

$$\Delta = c_1^2 - 4c_2(c_0 - P_0). \quad (15)$$

2. Если $\Delta = 0$, то $Q_{01} = Q_{02}$, т. е. уравнение имеет единственное решение, вычисляемое в соответствии с равенством

$$Q_{01} = -c_1. \quad (16)$$

3. Как вытекает из физической сущности решаемой задачи и физических основ функционирования НА, коэффициент c_1 может принимать только отрицательные значения, и эта особенность коэффициента c_1 может быть использована в качестве дополнительного критерия адекватности при построении полинома (6), аппроксимирующего напорную характеристику НА. И если она имеет место, то это означает, что полином недостаточно точно аппроксимирует напорную характеристику НА и его необходимо изменить, увеличив его порядок на единицу.

4. Если $\Delta < 0$, то это означает, что оба корня (Q_{01} и Q_{02}) уравнения (12) являются комплексными, что, очевидно, противоречит физической сущности решаемой задачи косвенного измерения расхода нефти через НА. Такими образом, отрицательность дискриминанта Δ является еще одним критерием адекватности описания напорной характеристики НА алгебраическим полиномом (12).

5. Когда дискриминант $\Delta > 0$, то оба корня (Q_{01} и Q_{02}) уравнения (12) являются вещественными, и так как коэффициент c_1 , как отмечено выше, является отрицательным, то корни Q_{01} и Q_{02} удовлетворяют неравенствам

$$\text{а) } Q_{01} > 0 \quad \text{и} \quad \text{б) } Q_{02} < 0, \quad (17)$$

и, следовательно, корень Q_{02} необходимо отбросить как противоречащий физической сущности решаемой задачи, а в качестве искомого значения расхода Q использовать корень Q_{01} , полагая при этом, что

$$Q = Q_{01}. \quad (18)$$

Подход, основанный на использовании функций, обратных к напорной характеристике НА. Таблицу 1 можно рассматривать не только как таблично заданную напорную характеристику НА, но и как табличное задание обратной для нее функции Q , определяемой равенством

$$Q = Q(P). \quad (19)$$

Отсюда и из табл. 1 видно, что для этого необходимо и достаточно рассматривать расход Q перекачиваемой через НА нефти как функцию, а развиваемое НА давление P – как аргумент данной функции, т. е. независимую величину, всякое измерение которой влечет за собой изменение расхода Q .

С точки зрения математического анализа подобная интерпретация переменных Q и P вполне уместна и допустима. Для математического анализа совершенно не существенны ни содержательная сущность этих переменных, ни причинно-следственные связи между ними. Существенными для него являются только количественные связи между переменными и характеризующие соизменения их численных значений. Поэтому табл. 1 можно рассматривать

как неявно заданную функцию, характеризующую количественные связи между расходом Q через НА и развиваемым им давлением P , а вопрос о том, какая из переменных величин, используемых для решения задачи косвенного измерения расхода, является функцией, а какая ее аргументом, необходимо решать исходя из целей дальнейшего использования данной функции.

При решении задачи косвенного измерения расхода нефти через НА наряду с использованием напорной характеристики НА в ряде случаев оказывается целесообразным использовать и обратную к ней функцию, определяемую равенством (19). Ее применение избавляет от необходимости решения квадратных или еще каких-либо иных нелинейных уравнений и позволяет све-сти вычисление искомого значения Q_0 расхода Q , соответствующего измеренному значению P_0 развиваемого НА давления P , к решению так называемой прямой задачи, т. е. к его вычислению в соответствии с равенством (19) с использованием при этом измеренного значения P_0 .

Замечание. Стоит заметить, что поскольку напорная характеристика $P = P(Q)$ всякого НА является непрерывной и монотонно убывающей с увеличением Q функцией, то обратная к ней функция $Q = Q(P)$ также является непрерывной и монотонно убывающей функцией. Учитывая это, можно вполне обоснованно заключить, что обратная функция $Q = Q(P)$ не является более сложной и, соответственно, менее доступной для аппроксимации функцией, чем исходная напорная характеристика $P = P(Q)$. Выбор аппроксимирующей функции не является математической задачей и в каждом конкретном случае осуществляется с учетом дополнительных не математических соображений. Для построения любой аппроксимации следует воспользоваться табл. 1.

Наличие трех изложенных выше подходов к созданию алгоритмов решения рассматриваемой задачи открывает широчайшие возможности не только построения отдельных алгоритмов ее решения, но и их комбинирования с целью получения в конечном счете более эффективных алгоритмов косвенного измерения расхода нефти через НА, обеспечивающих более высокую точность измерения расхода Q через НА и его устойчивость к ошибкам измерений давления P , развиваемого используемым НА.

4. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА НЕФТИ ЧЕРЕЗ КОМБИНАЦИЮ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ, ВКЛЮЧЕННЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО

Изложенные выше результаты касаются прежде всего косвенного измерения расхода нефти через какой-либо один НА. Однако, опираясь на эти результаты, можно получить методы и алгоритмы косвенного измерения расхода нефти через ту или иную комбинацию последовательно включенных НА. Такие возможности будут рассмотрены на примере простейшей комбинации, состоящей из двух последовательно включенных НА. Как будет видно далее, полученные при этом результаты переносятся и на более сложные комбинации, включающие в себе три и более последовательно включенных НА.

Предельно схематичное изображение рассматриваемой простейшей комбинации двух последовательно включенных НА приведено на рис. 2.



Рис. 2. Укрупненное схематическое представление простейшей комбинации двух последовательно включенных НА

Fig. 2. Enlarged schematic diagram of an elementary system of two consecutive PUs

Блок R здесь представляет местное гидравлическое сопротивление так называемой технологической обвязки НПС, с помощью которой осуществляется подключение НА в гидравлическую сеть МН и отключение их от данной сети или, что то же самое, ввод НА в технологический процесс перекачки нефти по МН и вывод НА из этого процесса.

Как видно из рис. 2, в данном случае имеется возможность вычислить не какое-то одно численное значение расхода Q_0 , соответствующее измеренному значению P_0 развиваемого НА давления P , а три подобных значения: Q'_0 , Q''_0 и Q'''_0 . Значения Q'_0 и Q''_0 вычисляются соответственно с использованием напорных характеристик НА-1 и НА-2, представленных равенствами вида (5), и развиваемых ими давлений P_1 и P_2 . Значение Q'''_0 вычисляется с учетом напорной характеристики последовательно включенных НА № 1 и НА № 2, описываемой равенством вида

$$P_{12}(Q) = s_0 + s_1 Q + s_2 Q^2, \quad (20)$$

коэффициенты s_i которой определяются следующими равенствами

$$s_i = c'_i + c''_i, \quad i = \overline{0, 2}, \quad (21)$$

а в качестве давления, необходимого для вычисления расхода Q'''_0 , используется суммарное давление, создаваемое рассматриваемой комбинацией НА и определяемое равенством

$$P_{12} = P_{10} + P_{20}. \quad (22)$$

Как вытекает из соотношений (20) и (21), вычисление значения Q'''_0 здесь также сводится к решению квадратного уравнения вида

$$P_{12} = s_0 + s_1 Q''' + s_2 (Q''')^2, \quad (23)$$

аналогичного уравнению (12), и, таким образом, для его решения можно воспользоваться любым из рассмотренных выше методов решения нелинейных уравнений. В частности, его корни можно вычислить, воспользовавшись равенством (13).

Следует отметить шесть обстоятельств, представляющих существенный интерес с точки зрения косвенного измерения расхода нефти по магистральным нефтепроводам.

1. Как видно из изложенного выше, при любых заданных значениях давлений на входах и выходах НА оказывается возможным вычислить три значения расхода нефти через комбинацию двух последовательно включенных НА. В свою очередь, наличие этих значений открывает возможность повысить точность косвенного измерения расхода нефти, перекачиваемой через рассматриваемую комбинацию включения НА. Очевидно, что для этого необходимо и достаточно рассматривать эти значения как результаты трехкратного измерения расхода нефти и обрабатывать их с помощью какого-либо из известных методов обработки подобных результатов (например, метода арифметического или взвешенного среднего, метода наименьших квадратов и т. п.). Как известно из теории вероятностей и математической статистики [19], полученное при этом значение расхода будет более точной оценкой его истинного значения, чем любое из значений Q'_0 , Q''_0 и Q'''_0 . В частности, если в качестве количественной меры точности использовать величину, обратно пропорциональную дисперсии ошибок измерения, и при этом считать значения Q'_0 , Q''_0 и Q'''_0 равноточными оценками истинного значения Q_0 расхода Q , то точность значения $\hat{Q}_0$, вычисленного согласно равенству

$$\hat{Q}_0 = (Q'_0 + Q''_0 + Q'''_0)/3, \quad (24)$$

окажется в 3 раза выше, чем точность любого из значений Q'_0 , Q''_0 и Q'''_0 .

2. Изложенные выше результаты получены в простейшем случае, когда комбинация НА, используемая для косвенного измерения расхода Q , состоит всего из двух последовательно включенных НА. Однако очевидно, что аналогичные результаты можно получить и в более сложных случаях, когда используемая для косвенного измерения расхода комбинация НА включает в себя три НА и более. Теоретически это можно сделать для любого числа последовательно включенных НА. Однако поскольку число одновременно действующих насосных агрегатов на любой НПС любого МН ограничено, то при рассмотрении обсуждаемых возможностей достаточно обойтись рассмотрением комбинации трех последовательно включенных НА. В этом случае можно организовать вычисление семи значений расхода перекачиваемой нефти, что существенно расширяет возможности получения более точных оценок измеряемого расхода нефти по МН.

3. Использование любой комбинации, содержащей 2 или 3 последовательно включенных НА, позволяет не только повысить точность измерения расхода перекачиваемой по МН нефти, но и решить ряд задач, представляющих существенный интерес с точки зрения эксплуатации МН и создания АСУ ТП перекачки нефти по МН. В частности, оно позволяет формировать и решать в реальном времени задачу подстройки коэффициентов напорных характеристик НА, контроля достоверности значения давления на входе и выходе каждого из НА, входящих в их комбинацию, используемую при косвенном измерении расхода нефти, обнаружения неисправности датчиков давления и их отказов и т. п.

4. Аналогичные возможности создания косвенных способов измерения расхода Q нефти и нефтепродуктов, перекачиваемых отдельными НА и НПС в целом, имеют место и при использовании мощностных характеристик, а также зависимостей коэффициента полезного действия (КПД) НА от расхода

перекачиваемой им нефти, графические представления которых приводятся в технической документации к каждому НА. Это обстоятельство позволяет создать два способа косвенного измерения расхода нефтепродуктов, перекачиваемых НА, и повышения точности его измерения за счет одномерного (параллельного) использования этих способов и взвешенного усреднения вычисляемых при этом значений перекачиваемой нефти.

5. Еще одной возможностью повышения точности косвенных измерений расхода перекачиваемых НА нефтепродуктов является использование не одного, а двух, трех и более измеренных значений давления, потребляемой НА мощности и его КПД и их усреднения тем или иным методом взвешенного усреднения, учитывающего погрешности усредняемых измеренных значений этих величин.

6. Характеристики НА для обеспечения адекватности представления необходимо уточнять по мере получения измеренных значений развиваемого НА давления, потребляемой НА мощности и его КПД, а также вычисленных значений расхода перекачиваемых НА нефтепродуктов.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В рамках представленных исследований ставилась задача аппроксимации (Q, P) характеристики НА алгебраическими полиномами различных порядков, а также их характеристик и оценка точности аппроксимации.

Вычисление коэффициентов полиномов осуществлялось методом оценивания неизвестных величин, основанным на применении псевдорешений [13, 14]. В качестве необходимых для его применения исходных данных использовались значения расхода Q и давления P , полученные путем оцифровки графиков (Q, P) , представленной на рис. 1. Всего было получено 100 точек (Q_j, P_i) .

В табл. 2 отображены результаты аппроксимации величин Q_j и P_j с использованием алгебраических полиномов 1-го, 2-го и 3-го порядка. В таблице содержатся числовые значения коэффициентов этих полиномов, а также соответствующие среднеквадратические ошибки S и средние относительные ошибки δ .

Таблица 2

Table 2

Результаты численных экспериментов

Results of numerical experiments

Порядок полинома	Коэффициенты полинома				S , Па	δ , %
	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

Представленные результаты демонстрируют непригодность полиномиальной модели первой степени для целей, поставленных в рамках текущего исследования, поэтому ее применение нерационально.

Анализ полученных результатов позволяет сказать, что полиномы 2-го и 3-го порядка аппроксимируют напорную характеристику НА с достаточной для практического применения точностью. Из табл. 2 видно, что средняя относительная ошибка аппроксимации [20] составляет меньше 0,5 %. Результаты аппроксимации напорной характеристики НА полиномом 3-го порядка представлены на рис. 3.

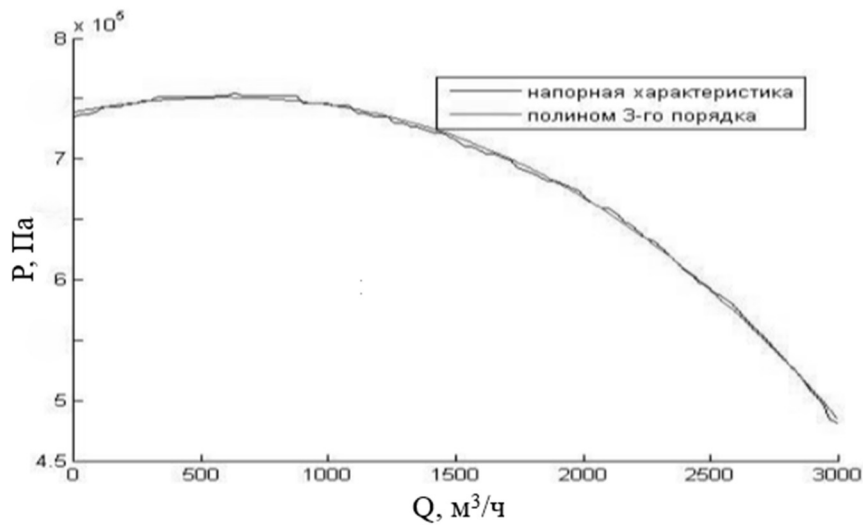


Рис. 3. Исходная функция и аппроксимирующий полином 3-го порядка

Fig. 3. Original function and an approximating third-order polynomial

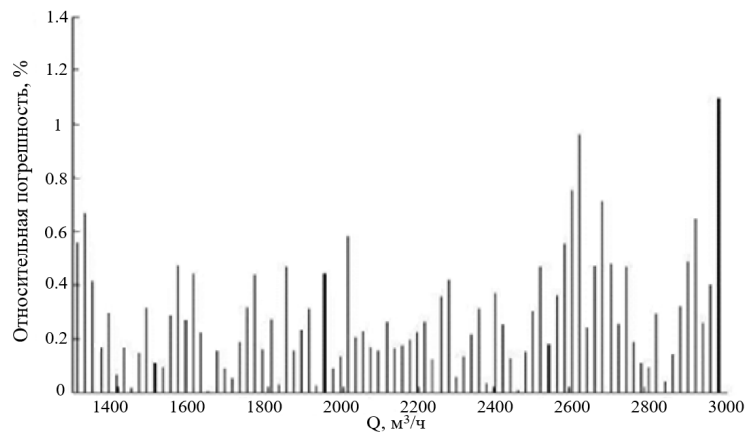


Рис. 4. Зависимость относительной погрешности от истинного значения расхода при использовании полинома 3-й степени

Fig. 4. Dependence of the relative error on the true flow rate value using a 3rd degree polynomial

Вычислим значения Q_0 расхода Q , используя полиномы 2-го и 3-го порядка, коэффициенты которых были получены в результате аппроксимации. Относительная погрешность при использовании полинома 2-го порядка не превышает 2,5 %. На рис. 3 представлена графическая зависимость относительной ошибки δ от истинного значения $Q_{\text{ист}}$ расхода Q , полученная при использовании полинома 3-го порядка.

Применение полинома 3-го порядка позволяет вычислять расход Q с относительной погрешностью не более 1,3 %, что видно на рис. 4.

Использование полиномов 2-го и 3-го порядков позволяет с требуемой точностью аппроксимировать напорную характеристику любого насосного агрегата. Выбор порядка полинома осуществляется исходя из требований к точности аппроксимации и вычислительных возможностей используемого оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении данной научной работы были получены следующие результаты.

1. Синтезирован и детально исследован метод и алгоритм косвенного измерения расхода нефтепродуктов перекачиваемых НА, основанный на аппроксимации напорной характеристики насосного агрегата алгебраическими полиномами 2-го и 3-го порядка. Этот метод применяется для различных типов трубопроводов, НА и любых видов перекачиваемых продуктов – как жидких, так и газообразных. Он позволяет с высокой точностью аппроксимировать напорные характеристики любого НА.

2. Разработанный метод позволяет получать методы и алгоритмы косвенного измерения расхода нефтепродуктов не только через один НА, но и через ту или иную комбинацию последовательно включенных НА. При любых заданных значениях давлений на входах и выходах НА оказывается возможным вычислить три значения расхода нефти через комбинацию двух последовательно включенных НА.

3. В связи с возникшей необходимостью замещения импортных измерительных приборов и программного обеспечения, используемых в современных трубопроводах, благодаря отечественным разработкам были синтезированы новые методы и алгоритмы, которые позволяют формулировать и решать не только задачи косвенного измерения расхода нефтепродуктов, но и целый ряд прикладных задач, связанных с построением математических моделей и численным моделированием технологических процессов и оборудования трубопроводов для дальнейшего их применения при проектировании АСУ ТП трубопроводами. Подобные работы в настоящее время проводятся как отечественными, так и иностранными специалистами [2, 9, 17]. Их главной задачей является повышение точности измерения расхода жидкостей, перекачиваемых по трубопроводам, и удешевление процесса сбора и обработки измерений, но на данном этапе нельзя сказать, что задача решена в полном объеме. Применение разработанных методов и алгоритмов позволит получить существенный экономический эффект от их внедрения, точная оценка которого будет зависеть от количества оборудования, применяемого на конкретном участке трубопровода или насосной станции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Майстренко А.В., Светлаков А.А. Косвенное измерение расхода жидкости, перекачиваемой насосными агрегатами // Доклады ТУСУРа. – 2014. – № 4 (34). – С. 215–220.
2. Indirect measurement of flow of liquid pumped with pump packages / A.V. Maystrenko, A.A. Svetlakov, T.V. Gandzha, N.V. Aksenova // Petroleum and Coal. – 2017. – Vol. 59 (2). – P. 244–249. – EDN PRTLIT.
3. Some problems in approximating processes and objects related to major oil pipelines with algebraic polynomials / A.V. Maystrenko, A.A. Svetlakov, T.V. Gandzha, V.M. Dmitriev, N.V. Aksenova // Petroleum and Coal. – 2019. – Vol. 61 (5). – P. 1025–1030. – EDN QPGVHD.
4. Фихтенгольц Г.М. Основы математического анализа. Ч. 1. – СПб.: Лань, 2001. – 440 с.
5. Жабо В.В., Уваров В.В. Гидравлика и насосы. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 328 с.
6. Насосы и компрессоры / С.А. Абдурашитов, А.А. Тупиченков, И.М. Вершинин, С.М. Тененголец. – М.: Недра, 1974. – 296 с.
7. Multiphase flow metering: current trends and future developments / G. Falcone, G.F. Hewitt, C. Alimonti, B. Harrison // Journal of Petroleum Technology. – 2002. – Vol. 54 (4). – P. 77–84.
8. Drury J.C. Ultrasonic flow detection for technicians. – UK: Silver wing Ltd., 2004. – P. 125–213.
9. Mass flow rate measurements in gasliquid flows by means of a Venturi or orifice plate coupled to a void fraction sensor / J.L.G. Oliveira, J.C. Passos, R. Verschaeren, C.V.D. Geld // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2009. – Vol. 33 (2). – P. 253–260.
10. Oddie G., Pearson J.R.A. Flow-rate measurement in two-phase flow // Annual Reviews of Fluid Mechanics. – 2004. – Vol. 36. – P. 149–172.
11. Orifice metering of two-phase flow / L. Mattar, M. Nicholson, K. Aziz, G.A. Gregoru // Journal of Petroleum Technology. – 1979. – Vol. 31 (8). – P. 955–961.
12. Майстренко А.В., Светлаков А.А. Оценивание параметров дифференциального уравнения, описывающего процессы запуска и останова насосного агрегата // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 1 (84). – С. 85–102. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-85-102.
13. Карелин А.Е., Майстренко А.В., Светлаков А.А. Обобщенные обратные матрицы и их применение в задачах автоматизации технологических процессов и производств. – Томск: ТУСУР, 2010. – 147 с.
14. Светлаков А.А. Обобщенные обратные матрицы: некоторые вопросы теории и применения в задачах автоматизации управления процессами. – Томск: Изд-во НТЛ, 2003. – 388 с.
15. Steven R.N. Wet gas metering with a horizontally mounted Venturi meter // Flow Measurement and Instrumentation. – 2002. – Vol. 12 (5–6). – P. 361–372.
16. Бобровников Г.Н., Новожиллов Б.М., Сарафанов В.Г. Бесконтактные расходомеры. – М.: Машиностроение, 1985. – 128 с.
17. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ. – СПб.: Политехника, 2004.
18. Биргер Г.И., Бражников Н.И. Ультразвуковые расходомеры. – М.: Металлургия, 1964. – 382 с.
19. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Академия, 2005. – 576 с.
20. Эрастов В.Е. Метрология, стандартизация и сертификация: учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2007. – 266 с.

Майстренко Андрей Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – автоматизация, дифференцирование, математическое моделирование. Имеет более 50 печатных работ. E-mail: maestro67@mail.ru

Maistrenko Andrei V., PhD (Eng.), associate professor at the Department of Computer Systems in Control and Design of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. His research interests are currently focused on automation, differentiation, mathematical modeling. He has more than 50 publications. E-mail: maestro67@mail.ru

Methods and algorithms for indirect measurement of oil product flow through pumping units and their application in automated pipeline control systems*

A.V. MAISTRENKO

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

maestro67@mail.ru

Abstract

This paper presents the formulation of the problem and the synthesis of new methods and algorithms for indirectly determining the flow rate of pumped petroleum products using the pressure characteristics of pumping stations. The proposed algorithms are based on three innovative approaches to solving this problem. The feasibility of indirectly measuring oil flow in a system of series-connected pumping units is analyzed and substantiated. The results of experimental studies of the developed methods and algorithms for measuring pump capacity are presented. Advances in microelectronics and measurement technology significantly expand the possibilities of equipping pipelines with modern flow meters; however, their high cost hinders their widespread implementation in existing pipelines. Consequently, flow meters are installed selectively, at significant distances from one another, resulting in a lack of information about the flows of pumped petroleum products along the entire length of the pipeline system. This placement of flow meters inevitably leads to insufficient information about the flow rates of pumped petroleum products through various sections of the pipeline. For the efficient operation of pumping stations and pipeline transport in general, precise knowledge of the volumes of petroleum products pumped through individual pumps or pipeline sections over a given time interval is essential [1, 2]. The development of modern real-time pipeline process control systems requires solving a complex set of problems related to the mathematical and numerical modeling of these processes. The results of computational experiments using synthesized methods and algorithms based on the approximation of the pumping unit pressure characteristic by algebraic polynomials are presented demonstrating their advantages in estimating the coefficients of these polynomials [3].

Keywords: automation, algorithm, algebraic polynomial, approximation, indirect measurements, main oil pipeline, mathematical modeling, method, pressure characteristic, pumping unit, control systems, technological process, function

REFERENCES

1. Maistrenko A.V., Svetlakov A.A. Kosvennoe izmerenie raskhoda zhidkosti, perekachivaemoi nasosnymi agregatami [Indirect measurement of the flow rate of liquid pumped by pumping units]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Proceedings of TUSUR University*, 2014, no. 4 (34), pp. 215–220.
2. Maystrenko A.V., Svetlakov A.A., Gandzha T.V., Aksenova N.V. Indirect measurement of flow of liquid pumped with pump packages. *Petroleum and Coal*, 2017, vol. 59 (2), pp. 244–249.
3. Maystrenko A.V., Svetlakov A.A., Gandzha T.V., Dmitriev V.M., Aksenova N.V. Some problems in approximating processes and objects related to major oil pipelines with algebraic polynomials. *Petroleum and Coal*, 2019, vol. 61 (5), pp. 1025–1030.
4. Fikhtengol'ts G.M. *Osnovy matematicheskogo analiza*. Ch. 1 [Fundamentals of mathematical analysis. Pt. 1]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2001. 440 p.
5. Zhabo V.V., Uvarov V.V. *Gidravlika i nasosy* [Hydraulics and pumps]. 2nd ed., rev. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 328 p.

* Received 19 September 2025.

6. Abdurashitov S.A., Tupichenkov A.A., Vershinin I.M., Tenengolts S.M. *Nasosy i kompressory* [Pumps and compressors]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 96 p.
7. Falcone G., Hewitt G.F., Alimonti C., Harrison B. Multiphase flow metering: current trends and future developments. *Journal of Petroleum Technology*, 2002, vol. 54 (4), pp. 77–84.
8. Drury J.C. *Ultrasonic flaw detection for technicians*. UK, Silver wing Ltd., 2004, pp. 125–213.
9. Oliveira J.L.G., Passos J.C., Verschaeren R., Geld C.V.D. Mass flow rate measurements in gasliquid flows by means of a Venturi or orifice plate coupled to a void fraction sensor. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2009, vol. 33 (2), pp. 253–260.
10. Oddie G., Pearson J.R.A. Flow-rate measurement in two-phase flow. *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, 2004, vol. 36, pp. 149–172.
11. Mattar L., Nicholson M., Aziz K., Gregoru G.A. Orifice metering of two-phase flow. *Journal of Petroleum Technology*, 1979, vol. 31 (8), pp. 955–961.
12. Maistrenko A.V., Maistrenko K.A., Svetlakov A.A. Dikhotomiya. Dikhotomiya? Dikhotomiya! Modifitsirovannyi metod dikhotomii resheniya nelineinykh skalyarnykh uravnenii i nekotorye rezultaty ego issledovaniy [Dichotomy. Dichotomy? Dichotomy! A modified method of dichotomy for solution of nonlinear scalar equations and some results of its investigation]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and data processing systems*, 2021, no. 1 (81), pp. 85–102. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-85-102.
13. Karelin A.E., Maistrenko A.V., Svetlakov A.A. *Obobshchennye obratnye matritsy i ikh primeneniye v zadachakh avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv* [Generalized inverse matrices and their application in problems of automation of technological processes and production]. Tomsk, TUSUR Publ., 2010. 147 p.
14. Svetlakov A.A. *Obobshchennye obratnye matritsy: nekotorye voprosy teorii i primeneniya v zadachakh avtomatizatsii upravleniya protsessami* [Generalized inverse matrices: some issues of theory and application in problems of automation of process control]. Tomsk, NTL Publ., 2003. 388 p.
15. Steven R.N. Wet gas metering with a horizontally mounted Venturi meter. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2002, vol. 12 (5–6), pp. 361–372.
16. Bobrovnikov G.N., Novozhilov B.M., Sarafanov V.G. *Beskontaktnye raskhodometry* [Contactless flowmeters]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 128 p.
17. Kremlevskii P.P. *Raskhodometry i schetchiki kolichestva veshchestv* [Flowmeters and counters quantities of substances]. St. Petersburg, Politekhnik Publ., 2004.
18. Birger G.I., Brazhnikov N.I. *Ul'trazvukovye raskhodometry* [Ultrasonic flowmeters]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1964. 382 p.
19. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostei* [Probability Theory]. Moscow, Akademiya Publ., 2005. 576 p.
20. Erastov V.E. *Metrologiya, standartizatsiya i sertifikatsiya* [Metrology, standardization and certification]. Tomsk, TUSUR Publ., 2007. 266 p.

Для цитирования:

Майстренко А.В. Методы и алгоритмы косвенного измерения расхода нефтепродуктов через насосные агрегаты и их применение в автоматизированных системах управления трубопроводами // Системы анализа и обработки данных. – 2025. – № 4 (100). – С. 105–122. – DOI: 10.17212/2782-2001-2025-4-105-122.

For citation:

Maistrenko A.V. Metody i algoritmy kosvennogo izmereniya raskhoda nefteproduktov cherez nasosnye agregaty i ikh primeneniye v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya truboprovodami [Methods and algorithms for indirect measurement of oil product flow through pumping units and their application in automated pipeline control systems]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and data processing systems*, 2025, no. 4 (100), pp. 105–122. DOI: 10.17212/2782-2001-2025-4-105-122.