

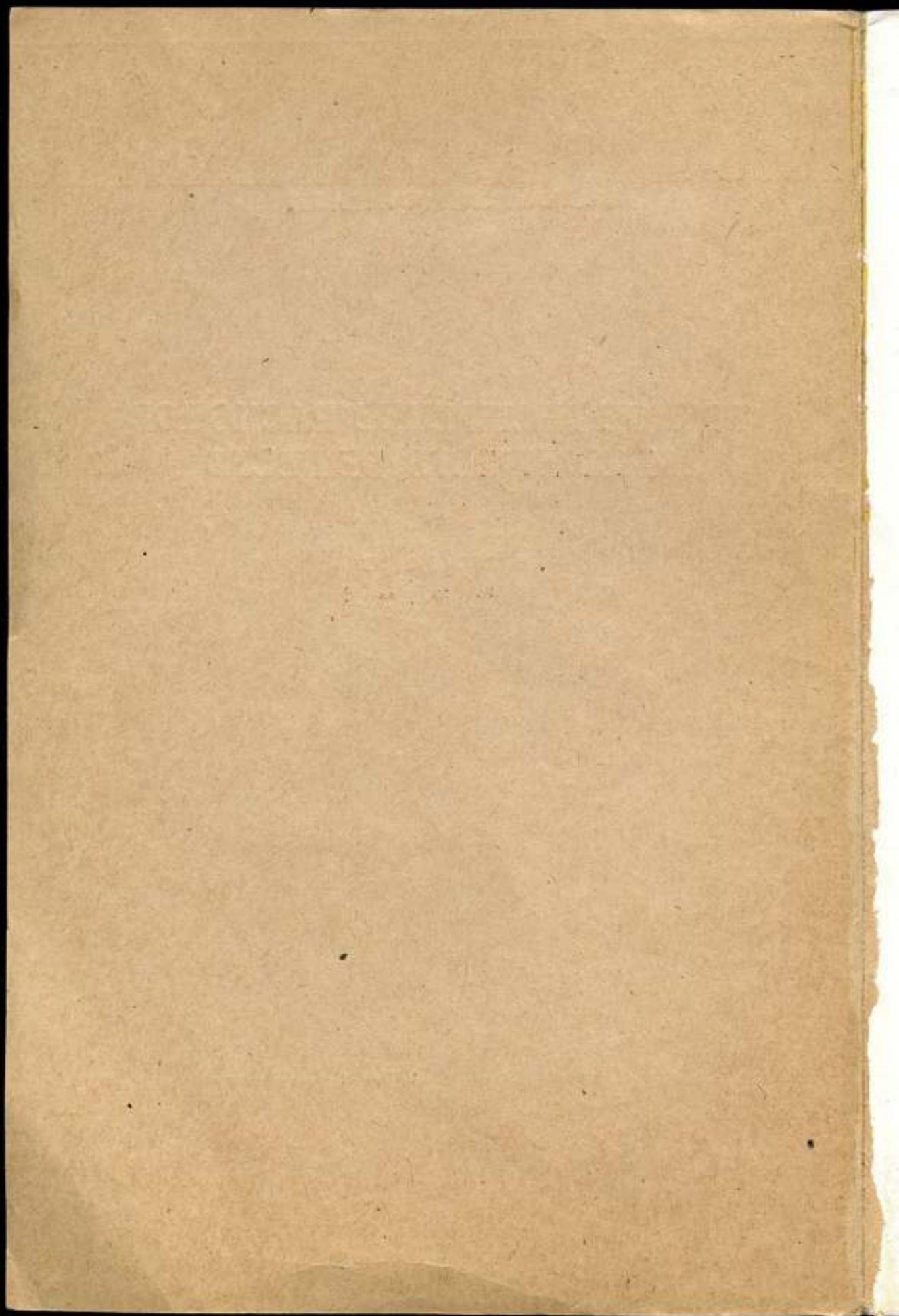
**ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ
И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

КАЗАНСКИЙ ФИЛИАЛ

**ТОЧНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДОВ
И КОЛИЧЕСТВ ВЕЩЕСТВ**

ВЫПУСК 122 (182)





ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ
КАЗАНСКИЙ ФИЛИАЛ

ТОЧНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДОВ И КОЛИЧЕСТВ ВЕЩЕСТВ

ВЫПУСК 122 (182)

ИЗДАТЕЛЬСТВО КОМИТЕТА СТАНДАРТОВ,
МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

МОСКВА — КАЗАНЬ

1970

В сборнике представлены доклады, заслушанные I все-союзным совещанием по вопросам точных измерений расходов, количества и вместимостей веществ, организованным Казанским филиалом ВНИИФТРИ совместно с Татарским правлением НТО приборостроительной промышленности и Татарским центральным бюро технической информации.

В сборнике сделана попытка систематизировать разрозненные метрологические исследования по одному из важнейших видов измерения — расходомерии.

Материалы сборника представляют интерес для специалистов, работающих в области создания как прецизионных, так и рабочих средств измерения расходов, количества и вместимостей веществ.

Редакционная коллегия:

М. Х. Воздвиженская, Б. Н. Меньшиков, П. Г. Тишков, А. А. Тупиченков,
В. И. Филатов

Ответственный редактор
канд. техн. наук доцент А. А. ТУПИЧЕНКОВ

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивный рост народного хозяйства, расширяющийся объем добычи, переработки и потребления различных веществ ставят перед приборостроительными организациями задачи по созданию приборов измерения расхода, количества и вместимости веществ, как средств, позволяющих организовать систему учета и распределения продукции.

Однако, как показал анализ измерительной техники, выпускаемые приборы недостаточно удовлетворяют запросы промышленности по их точности, диапазонам измерений, а также по характеристикам измеряемых сред.

К настоящему времени развитие этой важной области измерений сдерживается из-за отсутствия исходных метрологических средств и недостаточного объема метрологических исследований, что не позволяет обеспечить совершенствование приборов, а также организовать оперативный контроль за их работой в процессе эксплуатации.

Выход сборника следует рассматривать как начало объединения сил ученых-метрологов в деле создания и совершенствования исходных метрологических средств, а также исследований механизмов процессов, влияющих на точность измерений.

В связи с тем, что сборник построен на материалах I всесоюзного совещания по точным измерениям расхода, количества и вместимости веществ, он охватывает всю область метрологии расходомеров — от принципов создания системы метрологического обеспечения до исследований в области вторичных приборов, которые позволяют вскрыть резервы повышения точности.

Редакционная коллегия с благодарностью примет все замечания и пожелания, высказанные в связи с выходом настоящего сборника.

Редакционная коллегия

THE UNIVERSITY OF CHICAGO
DEPARTMENT OF CHEMISTRY
CHICAGO, ILLINOIS

MEMORANDUM FOR THE RECORD
DATE: [illegible]
TO: [illegible]
FROM: [illegible]

[The following text is extremely faint and largely illegible. It appears to be a report or memorandum detailing chemical research or experimental results.]

Very truly yours,
[illegible signature]

[illegible text]

ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ СЛУЖБЫ ТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ РАСХОДОВ, КОЛИЧЕСТВ И ВМЕСТИМОСТЕЙ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

За текущее пятилетие объем производства нефти, газа, цемента, минеральных удобрений и продуктов их переработки увеличится в 1,5—2 раза.

Выполнение этого объема, а также обеспечение экспорта веществ с достижением наибольшей экономической эффективности требует четкой организации измерений расходов, количеств и вместимостей веществ и службы надзора за их достоверностью. По показаниям приборов осуществляется учет потребляемого сырья и вырабатываемой продукции, планируются нормы расхода и потерь веществ при их переработке.

В ряде отраслей промышленности (нефтехимической, химической) расходомеры служат средством контроля за ведением технологических процессов, дозированием веществ, от чего зависит качество выпускаемой продукции.

Точность измерения расходов нефти и газов имеет большое значение при их транспортировке по магистральным трубопроводам, сеть которых непрерывно расширяется.

Для обеспечения всего объема измерений в промышленности используется большое количество приборов. Анализ измерительной техники, проведенный Казанским филиалом ВНИИФТРИ, показал, что доля измерений расходов, количеств и вместимостей веществ в общем объеме измерений составляет:

- а) по предприятиям нефтедобывающей промышленности — около 10%;
- б) по предприятиям нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности — около 15%.

В среднем по промышленности объем измерений составляет около 10%. Так, на среднем по мощности нефтехимическом предприятии измерение параметров осуществляется более чем в 2000 точках.

Однако уровень измерительной техники не удовлетворяет запросы народного хозяйства страны почти по всем основным показателям и характеристикам. Погрешность отечественных приборов велика и для большинства находится в пределах 1,5—2%, в то время, как необходимы приборы с погрешностью не более 0,5—1,0%.

Приборы, предлагаемые эксплуатационникам, не обеспечивают измерения всех диапазонов расходов, значение которых для основных веществ в современном производстве составляет (в $\text{м}^3/\text{ч}$):

нефть — 0,001 + 4000,
вода — 0,001 + 20 000,
газ — 0,001 + 500 000.

Выпускаемые промышленностью приборы калибруются в основном на воде. В результате погрешность их при работе на различных жидкостях увеличивается на 2—4% по сравнению с паспортной.

Организации, занимающиеся разработкой этого вида приборов, не выпускают образцовых средств, что исключает оперативный контроль за достоверностью показаний в процессе эксплуатации. Поэтому приборостроительные предприятия слабо осваивают многие типы приборов, получившие в последнее время за рубежом широкое распространение из-за высокой точности показаний, хороших гидродинамических характеристик и соответствия физико-химическим свойствам измеряемой среды.

В основном на предприятиях устанавливаются расходомеры переменного перепада давления, с погрешностью 1,5—2,5%. Количество таких приборов составляет около 80% всех эксплуатируемых приборов.

Подобное состояние техники измерений расходов, количеств и вместимостей веществ сложилось из-за того, что в стране до сих пор почти не уделялось внимания метрологическим исследованиям, разработке методов и созданию средств высокоточных измерений расходов и количеств веществ, которыми можно было бы оснастить ведомственные лаборатории и органы госнадзора для организации активной службы надзора.

Основные недостатки метрологического обеспечения в области разработки рабочих приборов состоят в том, что калибровочные расходомерные установки, на которых производятся исследования, калибровка и аттестация, в том числе и государственные испытания, по своим основным параметрам не удовлетворяют требованиям по улучшению характеристик рабочих приборов.

Вследствие низкой точности установки не могут служить научно-экспериментальной основой для совершенствования этой отрасли приборостроения, так как по существующим правилам точность аттестации установки должна быть в три раза выше, чем устанавливаемая точность калибруемых на ней рабочих приборов.

Метрологическая база приборостроительных организаций не обеспечивает также требуемых диапазонов измерений, из-за чего измерение расходов рабочими приборами не обеспечено. Например, при отпуске нефтепродуктов пользуются мерными рулетками, эксплуатационная погрешность которых в силу несовершенства и субъективности отсчетов составляет 1,5—2,0%. Особенно сложное положение в газовой промышленности, где в настоящее время осуществляется транспортировка газа по трубопроводам больших диаметров (до 2,5 м). Приборы с такими характеристиками в нашей стране не разрабатываются, так как нет соответствующих экспериментальных установок.

Расходомерные установки, на которых производится калибровка, аттестация и государственные испытания вновь создаваемых приборов, работают в основном на двух средах: жидкостные — на воде и газомерные — на воздухе.

Среда, на которой откалиброван прибор, указывается в паспорте, и только на данной среде этот прибор может быть узаконен органами госнадзора, как средство учета. Однако на предприятиях нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей, химической, газовой промышленности наиболее важен учет, распределение, отпуск иных веществ, особенно нефтепродуктов и органических газов.

В таком же состоянии находится метрологическая обеспеченность предприятий, эксплуатирующих приборы. Ни на одном предприятии, осуществляющем промышленную эксплуатацию приборов для измерения расхода, количества и вместимости веществ, нет расходомерных установок, на которых могла бы осуществляться периодическая поверка приборов, калибровка и аттестация. Практически созданы только образцовые приборы для поверки приборов переменного перепада.

На учетных участках не практикуется установка образцовых и контрольных средств, которые позволили бы проверить показания рабочих приборов в процессе эксплуатации.

Органы госнадзора не располагают испытательными расходомерными установками, в силу чего активный надзор и контроль за работой приборов не обеспечены.

Метрологические институты Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР также не имеют соответствующих расходомерных установок, поэтому метрологические разработки в области расходомерии ведутся недостаточно широко.

Метрологическое обеспечение народного хозяйства осуществляет сейчас только одна газомерная установка во ВНИИМ, работающая на воздухе, с производительностью $300 \text{ м}^3/\text{ч}$ при точности 0,2%, и очень маленькая установка во ВНИИК. Все это наносит значительный экономический ущерб народному хозяйству. Исследования, проведенные сотрудниками ВНИИМ и ВНИИК, показали, что при снижении погрешности измерения расхода и количества веществ на 0,5% только по нефтехимической и газовой промышленности можно добиться экономического эффекта в 20 млн. руб. Такой же эффект можно получить только по газовой отрасли народного хозяйства, если снизить погрешность измерения на 1%.

Чтобы ликвидировать отставание, необходимо создать в стране систему метрологического обеспечения. Для этого требуется быстрее разработать высокоточных приборов и средств поверки и внедрение их в первую очередь на те производственные участки, где от достоверности показаний зависят учет и качество выпускаемой продукции.

При создании системы метрологического обеспечения нужно учесть следующее:

1. Должна быть осуществлена полная взаимосвязь измерительной техники (схема 1, табл. 1).

2. Необходимо создать службу надзора за состоянием измерительной техники (табл. 2) и внедрить единую поверочную схему средств измерения расходов и количеств веществ.

Исходя из особого значения, которое имеет организация оперативной службы контроля за эксплуатируемыми приборами расхода, количества и вместимости в экономике страны, при создании ведомственного надзора необходимо, в первую очередь, ориентироваться на укомплектование учетных участков надежными и компактными образцовыми приборами и средствами, позволяющими производить поверку в рабочих условиях.

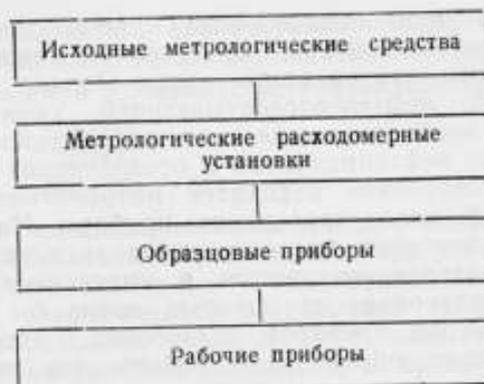


Схема 1.

Надзор должен производиться лабораториями государственного надзора (ЛГН) и управлениями государственного надзора (УГН), для чего необходимо предусмотреть соответствующее их развитие, а метрологическое обеспечение этой отрасли измерения должно осуществляться метрологическими институтами и организациями Комитета стандартов.

Таблица 1

Профиль предприятия или организации	Необходимые метрологические средства	Класс приборов или установок
Эксплуатация прибора (обслуживание, ремонт, ведомственная поверка)	Расходомерные установки и образцовые приборы II разряда	0,4÷0,6
Разработка рабочих приборов (ОКР, изготовление, калибровка, госиспытания)	Расходомерные установки I разряда	0,1÷0,3
Разработка поверочных установок и калибровочных средств (НИР и ОКР, калибровка, аттестация, госиспытания)	Метрологические расходомерные установки	0,05÷0,1

Предполагается, что научно-техническое и методическое руководство всеми видами метрологического обеспечения будет осуществляться метрологическим центром, оснащенным наиболее точными расходомерными установками — Государственным метрологическим комплексом расходомерных станций (ГМКРС).

На местах метрологическое обеспечение должны осуществлять специализированные метрологические службы, которые могут находиться в составе местных органов госнадзора или (в наиболее промышленных районах страны) могут быть отдельными самостоятельными службами с подчинением их метрологическому центру (схема 2).

3. При организации службы точных измерений расходов, количеств и вместимостей веществ большую роль будет играть рациональное размещение соответствующих подразделений и организаций, а также укомплектование их квалифицированными кадрами. Процесс создания системы метрологического обеспечения должен происходить последовательно, охватывая наиболее важные экономические районы страны, в которых сконцентрированы такие отрасли промышленности, как нефтяная, химическая, газовая. При создании служб надзора

Таблица 2

Вид надзора	Подчинение	Осуществляемые функции
Ведомственный надзор при эксплуатации рабочих приборов	Министерству или центральному ведомству данной отрасли народного хозяйства	Контроль за правильностью эксплуатации, состоянием и ремонтом измерительной техники; периодическая поверка правильности показаний; калибровка после текущего и среднего ремонта; поверка перед установкой новых приборов и после капитального ремонта. Разработка внутренних инструкций по эксплуатации, поверке и ремонту рабочих приборов
Ведомственный надзор при разработке рабочих и образцовых приборов	То же	Контроль за калибровкой и аттестацией разработанных приборов, участие в госиспытаниях. Контроль и аттестация приборов после капитального ремонта. Разработка внутренних нормативных документов по проведению калибровочных и аттестационных работ, а также по приемке и аттестации приборов после капитального ремонта
Государственный надзор или надзор специальными метрологическими службами	Комитету стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР	Контроль за состоянием и правильностью эксплуатации учетных рабочих приборов, образцовых приборов и расходомерных установок; поверка и освидетельствование рабочих приборов как периодическая, так и после ремонта; контроль за выполнением „Правил“ и стандартов. Обеспечение организаций ведомственного надзора соответствующей документацией. Аттестация и пера-аттестация поверочных и калибровочных средств ведомственного надзора
Метрологическое обеспечение измерений расхода, количества и вместимостей веществ	Комитету стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР	Проведение НИР и ОКР в области создания средств поверки и калибровки приборов; обеспечение проведения сложных гидродинамических исследований при разработке приборов и средств; проведение госиспытаний приборов, обеспечение единообразия измерений; разработка нормативных и методических материалов и их утверждение; координация работ в области надзора и метрологического обеспечения измерения расхода, количества и вместимости веществ; подготовка и повышение квалификации кадров

необходимо, чтобы ведомственные подразделения надзора создавались как специализированные ведомственные лаборатории при наиболее крупных промышленных предприятиях или входили в состав трестов и объединений.

В случае сочетания в данном экономическом районе предприятий, эксплуатирующих и разрабатывающих приборы, может быть признано рациональным создание межведомственной специализированной лабо-

рактории. Одновременно с созданием лабораторий ведомственного надзора должно происходить образование специализированных пунктов метрологического обеспечения или создание соответствующих отделов при лабораториях госнадзора или управлениях госнадзора.

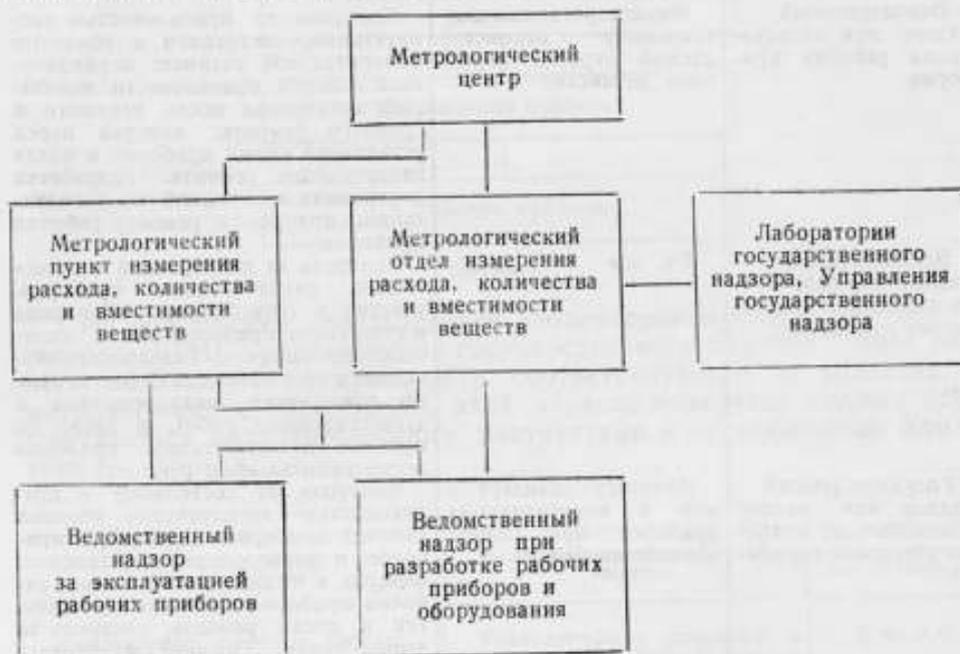


Схема 2.

На карте (рис. 1) обозначены пункты размещения специализированных подразделений для обеспечения службы расхода (учитывая наличие Казанского филиала ВНИИФТРИ, являющегося головной метрологической организацией).

Все подразделения службы расхода необходимо обеспечить квалифицированными кадрами. Единственное в стране метрологическое учебное заведение — Одесский техникум измерений — не в состоянии будет обеспечить кадрами эту отрасль метрологии. Следует составить план повышения квалификации кадров, уже занятых на работе в системе Комитета стандартов, а также готовящихся работать в ней. Необходимо наладить выпуск специалистов-метрологов в высших учебных заведениях.

Как было отмечено, для нормализации этой важнейшей отрасли измерений необходимо создание метрологического центра — Государственного метрологического комплекса расходомерных станций (рис. 2).

Создание подобного центра необходимо для:

обеспечения единства измерений расходов, количеств и вместимостей веществ;

разработки и создания опытных образцов стационарных и передвижных поверочных средств для оснащения промышленности, а также для методического руководства поверочными работами;

проведения аттестации и проверок приборов высокой точности при их разработке, изготовлении и эксплуатации;



Рис. 1. Карта размещения специализированных подразделений службы расхода.

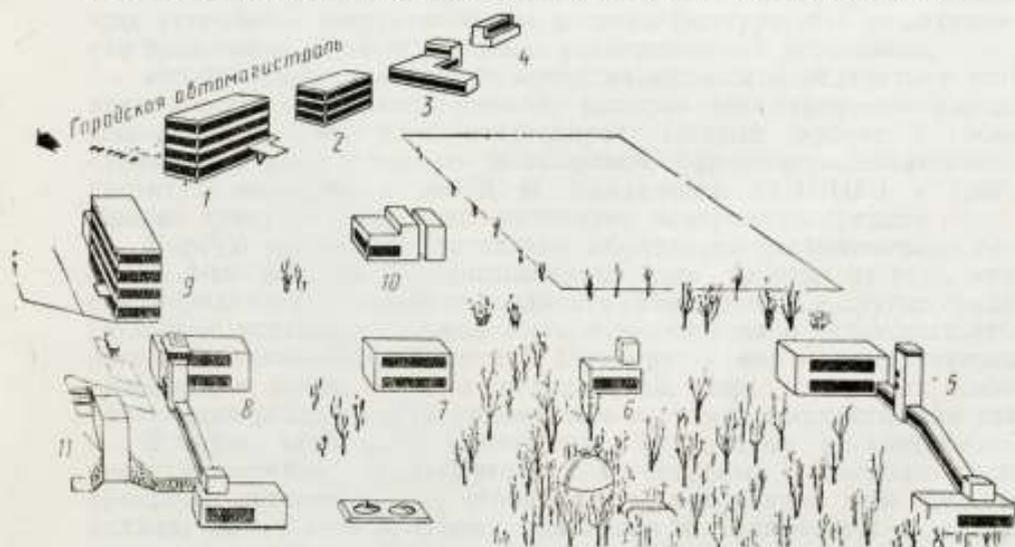


Рис. 2. Государственный метрологический комплекс расходомерных станций:

- 1 — инженерный корпус; 2 — опытное производство; 3 — газомерная станция; 4 — станция сыпучих материалов; 5 — водомерная станция; 6 — станция для пыли и шлама;
 7 — станции сжиженных газов; 8 — станция нефтепродуктов; 9 — корпус стандартных образцов; 10 — станция агрессивных жидкостей; 11 — подъемное устройство.

установления методов высшей точности для воспроизведения единиц измерения расходов, количеств и вместимостей веществ, а также хранения и совершенствования эталонных образцовых приборов и установок;

осуществления специализации кадров;

обеспечения научно-технических исследований, связанных с участием СССР в международных работах.

Предполагаемый комплекс ГМКРС является сложным техническим сооружением, включающим около ста расходомерных установок на нефть, газ, воду, агрессивные жидкости, сжиженные газы, суспензии, сыпучие материалы и т. д. При осуществлении почти всех диапазонов измерений с погрешностью от 0,05 до 0,2% это обеспечит в основном все запросы промышленности.



ЗАДАЧИ МЕТРОЛОГИИ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Все основные задачи метрологии в области измерения расхода жидкостей и газов, равно как и в любой другой области измерительной техники, целесообразно разделить на две группы.

Первая группа охватывает круг вопросов, связанных с поддержанием единства измерений и обеспечением поверки приборов как вновь изготавливаемых, так и находящихся в эксплуатации. Она соответствует метрологическим задачам, понимаемым в сравнительно узком смысле.

Вторая группа, соответствующая более широкому пониманию задач метрологии, охватывает совершенствование существующих методов измерения и наряду с этим разработку новых.

Для решения задач, относящихся к **первой группе**, следует иметь достаточное количество аттестованных поверочных средств всех необходимых категорий и, кроме того, надо располагать нормированными методами поверки. В качестве примера последних можно указать „Правила 28—64. Измерения расхода жидкости, газов и паров стандартными диафрагмами и соплами“, устанавливающие возможность поверки и применения трех типов стандартных сужающих устройств: диафрагм, сопел и сопел Вентури, без необходимости испытания их на образцовых расходомерных установках.

Необходимые поверочные средства должны определяться соответствующей поверочной схемой, которая для измерения расхода жидкостей и газов пока отсутствует. Первый проект подобной схемы был разработан во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ) в 1967 г. Проект предусматривает две категории поверочных средств.

Первую категорию составляют образцовые расходомерные установки 1-го разряда, предназначенные для работы на газе, воде, нефтепродуктах, а также на жидкостях-заменителях и других средах. Подобные установки должны быть в институтах и некоторых лабораториях госнадзора Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, и, кроме того, на предприятиях, разрабатывающих и изготавливающих различные расходомеры и счетчики жидкости или газа.

Вторую категорию составляют образцовые и контрольные средства поверки, градуируемые и аттестуемые с помощью расходомерных установок. По сравнению с последними эти средства должны быть более простыми, дешевыми и, следовательно, доступными для широкого применения как в лабораториях госнадзора, так и у всех крупных потребителей расходомеров и счетчиков жидкости

и газа, в частности, в системе областных управлений газового хозяйства. Естественно, что образцовые средства второй категории могут иметь меньшую точность, чем точность расходомерных установок, являющихся образцовыми средствами первой категории.

Предлагаемую поверочную схему целесообразно дополнить поверочными средствами третьей категории, предназначенными для поверки приборов на месте их установки, желательно даже без демонтажа их из трубопровода.

Успешная разработка соответствующих поверочных средств позволит охватить поверкой практически все приборы для измерения расходов и количеств веществ, что даст весьма большой технико-экономический эффект (несколько десятков миллионов рублей), за счет существенного увеличения точности измерений. Применение измерительных средств рассматриваемой третьей категории должно основываться на нормированной методике, а сами средства должны быть проградуированы с помощью расходомерных установок либо поверены непосредственно по своим параметрам.

Для реализации данной поверочной схемы предстоит решить много задач научного, конструкторского и организационного характера. Так, сравнительно ясен лишь вопрос о том, какими должны быть расходомерные установки, работающие на воде, нефтепродуктах и других жидкостях.

Подобные установки с измерением объема прошедшей жидкости могут иметь погрешность, не превышающую $\pm 0,1 + 0,2\%$, а с измерением массы $\pm 0,05 + 0,1\%$. Каждую расходомерную установку целесообразно рассчитывать на десятикратный диапазон изменения расходов. Тогда необходимо иметь не менее восьми типоразмеров установок для охвата всех расходов жидкостей в диапазоне $10^{-4} + 10^4 \text{ м}^3/\text{ч}$ и восьми типоразмеров — для охвата расходов в диапазоне $10^{-1} + 10^7 \text{ кг/ч}$.

Расходомерные установки, предназначенные для жидкостей-заменителей, могут охватывать меньший диапазон, примерно от 10 кг/ч до $2,5 \cdot 10^5 \text{ кг/ч}$.

Сложнее с расходомерными установками, работающими на воздухе. Для поверки счетчиков газа объемного типа могут служить обычные колокольные газомерные установки, но лишь для небольших и средних расходов. Напомним, что с помощью даже большого колокольного мерника объемом 10 м^3 можно поверять счетчики газа на расходах, не превышающих $200 + 400 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Разработанные во ВНИИМ автоматические колокольные газомерные установки повышают примерно в десять раз величину поверяемых расходов при той же самой емкости колоколов. Однако пока построены, исследованы и аттестованы автоматические газомерные установки лишь с емкостью колоколов не более 5 м^3 , рассчитанные на расходы до $1500 \text{ м}^3/\text{ч}$. В какой мере этот принцип может быть положен в основу создания газомерных установок на расходы $10000 + 15000 \text{ м}^3/\text{ч}$, не ясно.

Колокольные газомерные установки как обычные, так и автоматизированные хорошо подходят для поверки счетчиков газа и значительно хуже — для поверки расходомеров газа (ввиду того, что они не обеспечивают строгого постоянства расходов). Более равномерный расход достигается с помощью установок, в которых воздух вытесняется водой из герметичного мерного бака, но они пригодны лишь для небольших расходов. Поэтому задача разработки образцовых установок, пригодных для поверки расходомеров газа для

средних и больших расходов, очень актуальна. Одно из возможных ее решений заключается в осуществлении с заданной скоростью перемещения подвижного элемента, вытесняющего воздух в трубопровод, на котором установлен поверяемый прибор. Опытная газомерная установка, основанная на данном принципе, изготавливается во ВНИИМ.

Пока речь шла лишь о газомерных установках объемного типа и работающих при низком давлении. Между тем сейчас на очередь уже поставлен вопрос о создании образцовых установок для поверки и градуировки расходомеров и счетчиков газа в единицах массы и, кроме того, установок, работающих при повышенном давлении. Отсутствие их тормозит организацию производства крайне необходимых стране массовых расходомеров и счетчиков газа.

ВНИИМ провел предварительные работы по анализу возможных схем построения подобных установок, в частности, весового типа. Определены требования, которым должны удовлетворять такие установки, указаны пути разгрузки весового устройства от веса тары, определена необходимая точность весовых устройств и вместе с тем отмечена большая сложность поддержания должного температурного режима в подобной установке. Естественно, напрашивается вывод о поиске других путей создания образцовых установок для поверки и градуировки массовых расходомеров и измерителей количества.

Один из таких путей — применение калориметрического расходомера в качестве образцового. Опытный образец такого прибора исследуется во ВНИИМ. Другой — применение нормального сопла в качестве первичного преобразователя образцового расходомерного устройства. В СКБ „Газприборавтоматика“ в содружестве с ВНИИМ разработана и построена интересная газомерная установка кольцевого типа с нормальным соплом, которая может работать при давлении, достигающем до $1,2 \text{ Мн/м}^2$ (12 кгс/см^2) и на расходах до 10000 кг/ч . В дальнейшем необходимо иметь не менее восьми типоразмеров газомерных установок на диапазон расходов 10^{-3} — $10^5 \text{ м}^3/\text{ч}$ и не менее восьми типоразмеров на диапазон расходов 10^{-3} — 10^5 кг/ч .

Переходим к образцовым и поверочным средствам второй и третьей категорий, т. е. средствам, которыми должны были бы располагать в основном лаборатории государственного надзора и потребители. К числу таких средств можно отнести, например, сопловые газомерные установки, включающие набор отверстий истечения, устанавливаемых в днище цилиндрического сосуда. Различная комбинация подобных отверстий дает возможность поверки счетчиков газа при различных расходах. Основной недостаток этих установок — их ограниченная точность, оцениваемая погрешностью около $\pm 1\%$. Таким образом, возникает задача разработки более совершенных поверочных средств, а также способов поверки приборов на местах.

В связи с этим во ВНИИМ разработаны и построены два опытных образца контрольных приборов крыльчато-тахометрического типа, имеющих погрешность около $\pm 0,6\%$. Применение подобных приборов в ряде случаев весьма перспективно.

Большой интерес представляют трубопоршневые испытательные установки, получившие широкое применение за рубежом, прежде всего для поверки различных счетчиков жидкости (в частности, счетчиков нефтепродуктов). Между тем у нас этими установками занимаются недостаточно. Правда, один отраслевой институт построил опытную трубопоршневую установку, испытание которой

дало возможность разработать во ВНИИК проект методических указаний по их применению. Но для организации производства подобных установок и их внедрения предстоит еще сделать много.

Очень важной и далеко не решенной проблемой является разработка методов и средств поверки расходомеров жидкости и газа на месте их установки без выемки из трубопровода. Как показали испытания, проведенные в Ленинграде, весьма перспективно, например, применение концентрационного метода измерения расхода воды. С его помощью удалось проконтролировать состояние труб Вентури, установленных и работающих на водяных магистралях непрерывно в течение нескольких десятков лет. Во ВНИИМ исследуют этот метод с целью определения его нормирования. Возможны и другие направления работ в области контроля расходомеров без выемки их из трубопровода.

Перейдем ко **второй группе** метрологических задач по разработке новых и совершенствованию существующих методов измерения расхода. В настоящее время не менее 70—80% расходомеров, эксплуатируемых у нас и за рубежом, являются приборами переменного перепада давления с сужающими устройствами в качестве первичных преобразователей расхода. В связи с этим большое значение имеет совершенствование методов измерения расхода с помощью таких приборов.

Здесь можно наметить следующие задачи:

исследование и стандартизацию сужающих устройств, например, сопло „четверть круга“, сегментная диафрагма, расходомерные трубы (типа Вентури и Долла) и т. п.;

исследование и стандартизацию сужающих устройств для труб диаметром менее 50 мм;

установку на основе исследования обоснованных требований к минимальным длинам прямых участков и, прежде всего, к длинам участков между регулирующим клапаном и сужающим устройством и т. п.

Наряду с сужающими устройствами необходимо провести исследование и стандартизацию напорных трубок.

Очень важно совершенствование методов измерения с помощью расходомеров обтекания и, в том числе ротаметров, крайне необходимых для измерения расхода десятков и сотен различных жидкостей и газов. Между тем ротаметры, предназначенные для жидкостей, градуируются сейчас на воде, а предназначенные для газов,— только на воздухе. Необходимо как можно скорее стандартизировать методику пересчета градуировки ротаметров с одной среды на другую.

Успешное начало этой работе в свое время было положено во ВНИИК, но, к сожалению, не доведено до конца. Решение ее позволит осуществлять эффективный контроль многих технологических процессов в различных отраслях промышленности.

Однако не только ротаметры, но и другие типы расходомеров обтекания, такие, как поплавковые расходомеры и расходомеры с поворотным крылом, требуют решения проблемы стандартизации методик пересчета их градуировок с одной среды на другую. Следует напомнить, что эти приборы широко разрабатываются, но их применение тормозится из-за отсутствия методик пересчета их градуировок.

Наряду с совершенствованием измерений с помощью расходомеров переменного перепада давления и расходомеров обтекания

необходимо разрабатывать и исследовать новые методы измерений расхода, а также новые методы поверки расходомеров.

В качестве примера, укажем на метод измерения расхода загрязненных и высокотемпературных газов с помощью галоидных меток потока, предложенный во Всесоюзном научно-исследовательском институте газовой промышленности и исследованный во ВНИИМ, а также на уже упоминавшийся концентрационный метод измерения расхода водных потоков, разработанный во Всесоюзном научно-исследовательском институте гидромеханизации санитарно-технических и специальных строительных работ (ВНИИГС) и исследуемый в настоящее время во ВНИИМ.

Среди новых методов поверки расходомеров следует прежде всего назвать безжидкостный метод поверки и градуировки электромагнитных расходомеров, разработанный во Всесоюзном научно-исследовательском институте теплоэнергетического приборостроения. Но для внедрения его необходимо предварительно провести большую исследовательскую работу по определению эмпирических коэффициентов для всех типоразмеров первичных преобразователей электромагнитных расходомеров. После завершения этой работы, выполняемой сейчас рядом организаций под руководством ВНИИМ, можно будет стандартизировать данный метод.

Сравнительно новая проблема — измерение расхода жидких металлов и связанная с ней задача исследования и аттестации соответствующих образцовых установок. Последняя задача решается в настоящее время во ВНИИМ.

В статье перечислены лишь некоторые проблемы, связанные с разработкой новых и совершенствованием существующих методов измерения расхода. Для успешного решения этих проблем необходимы координированные усилия многих ведомств и организаций, прежде всего усиление и развитие этих работ в институтах системы Комитета стандартов, мер и измерительных приборов.

СОЗДАНИЕ СРЕДСТВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ ДАТЧИКОВ РАСХОДА НА РАЗЛИЧНЫЕ СРЕДЫ

В последнее время стали широко использоваться приборы теплоэнергетического контроля для работы с жидкими металлами, токсичными, агрессивными и взрывоопасными средами при высоких давлениях и температурах. Большое место в выпуске и применении приборов контроля занимают приборы для измерения расхода.

Для контроля и регулирования технологических процессов в различных отраслях промышленности необходимо осуществлять измерения расхода сред, характеризующихся различными физическими и химическими свойствами (вязкость, плотность, электропроводность, агрессивность, токсичность, наличие твердых и газовых фаз) и различными параметрами (давление, температура, скорость течения и др.).

Многообразие и сложность требований, предъявляемых современной наукой и техникой к техническим характеристикам датчиков расхода, обусловили появление новых методов измерения расхода: индукционных, ультразвуковых, тепловых, вихревых, тахометрических и др.

Однако требования к этим приборам непрерывно возрастают, поэтому необходимо: повысить их точность до $\pm 0,1 - 0,5\%$, улучшить динамические свойства, повысить надежность и долговечность, добиться независимости результатов измерения от изменения температуры и давления контролируемой среды.

Увеличиваются диапазоны измеряемых расходов, давление и температура контролируемой среды. Например, необходимо уже сейчас измерять расходы при весьма высоких давлениях, превосходящих 100 Мн/м^2 (1000 кгс/см^2) и очень низких температурах, например, до -270°C (в криогенной технике).

Следовательно, для выпуска и поверки датчиков расхода в условиях эксплуатации необходимы контрольные средства, которые обеспечат поверку расходомеров в широких пределах — до $25000 \text{ м}^3/\text{ч}$ при высоких и низких температурах.

Однако имеющиеся контрольные средства не обеспечивают в должной мере градуировку выпускаемых приборов. Кроме того, отсутствует необходимая номенклатура контрольных средств, не производится периодическая поверка расходомеров, находящихся в эксплуатации, задерживаются разработки новых более точных датчиков расхода.

За рубежом имеются расходомерные станции на пределы измерения до $3200 \text{ м}^3/\text{ч}$ с классом точности $0,03 - 0,1\%$ для поверки

расходомеров, работающих на воде и нефтепродуктах, и расходомерные трубопоршневые установки для поверки приборов, работающих на различных средах [1; 2; 3].

Научно-исследовательский институт теплоэнергетического приборостроения проводит работы по созданию расходомерных установок на различные среды (вода, керосин, дизельное топливо, каменно-

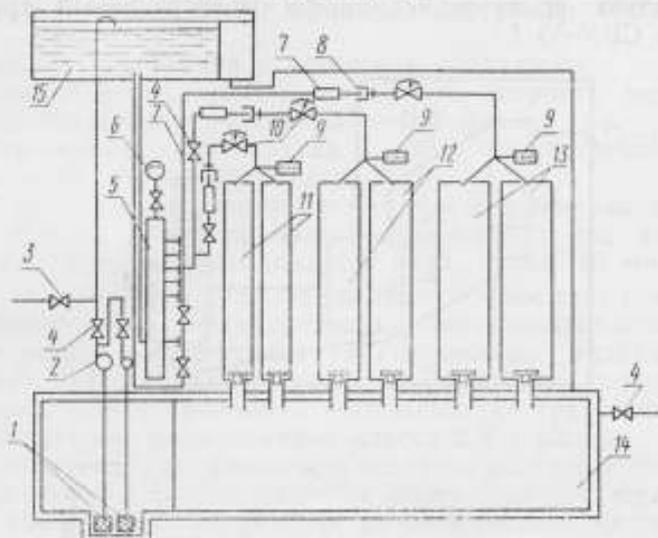


Рис. 1. Расходомерная установка на воду РУ-100.

угольная смола, жидкий металл, сыпучие среды). При создании расходомерных установок, кроме поверки основных метрологических характеристик, учитывается необходимость иметь возможность испытания датчиков расхода на надежность. Остановимся на рассмотрении некоторых расходомерных установок.

1. Расходомерная установка на воду РУ-100 (рис. 1) основана на объемном методе измерения. Она имеет три группы мерных баков 11, 12, 13, позволяющих измерять расход в диапазонах соответственно 0—10; 0—20; 0—100 м³/ч, напорный бак 15 (V = 3500 л), фильтр 1, сливной резервуар 14 (V = 7500 л), перекидные устройства, измерители времени 9, запорную 3, 4 и регулировочную 10 арматуру, напорный, сливной, измерительный и подводный трубопровод и коллектор 5, насос 2, манометр 6, испытуемый прибор 7, компенсатор длины 8.

Относительная погрешность измерения количества 0,2 ÷ 0,26%. Температура измеряемой среды 20 ± 5°С [1, 2].

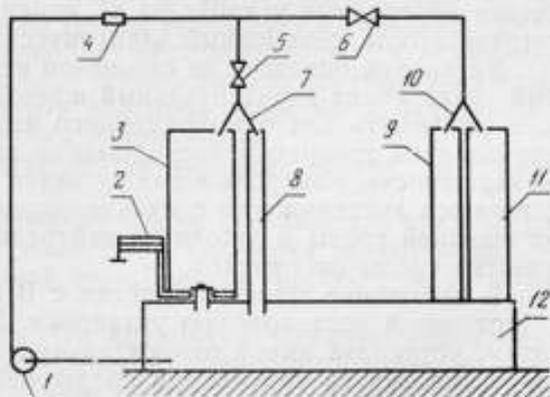


Рис. 2. Расходомерная установка на керосин, масло и дизельное топливо РУ-30.

2. Расходомерная установка на керосин, масло и дизельное топливо РУ-30 (рис. 2) основана на объемном и весовом методе измерения и имеет: сливной бак 12 ($V=1200$ л), мерные баки 9, 11 ($V=550$ и 110 л), весы 2 РП-500-ГВМ (500 кг по верхнему пределу), весовой бак 3 ($V=200$ л), перекидные устройства 7, 10, датчик 4, вентили 5, 6, пролетный рукав 8, измерители времени, запорную и регулируемую арматуру, сливной и измерительный трубопровод, насос типа СВМ-80 1.

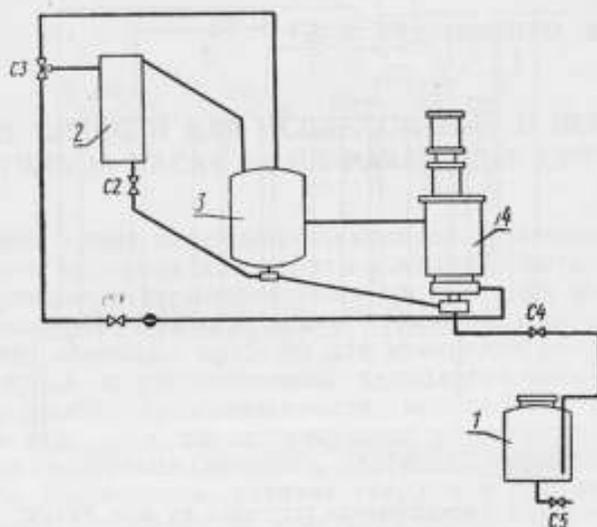


Рис. 3. Расходомерная установка на металл РУ-16.

Установка имеет аттестованные мерные баки и весы. Класс точности по измерению расхода объемным методом $0,5\%$, весовым — $0,1\%$. Температура измеряемой среды от 15 до $40 \pm 5^\circ \text{C}$. Аттестация установок (рис. 1, 2) проводится во ВНИИК [2].

3. Расходомерная установка на металл РУ-16 (рис. 3) имеет: плавильный бак 1 ($V=510$ л) и мерный бак 2 ($V=150$ л), буферную емкость 3 ($V=510$ л), центробежный насос 4 (типа ЦН), гидравлические перекидные устройства C_3 , измеритель времени, контрольные сигнализаторы, секционный электрический обогрев.

Установка основана на объемном методе измерения. Измерительный тракт имеет горизонтальный и вертикальный участки, позволяющие размещать для одновременного испытания до 10 расходомеров, производить тарировку расходомеров по мерному баку и испытания на надежность. Контроль и поддержание заданных параметров осуществляются дистанционно с пульта управления. Система изолирована от внешней среды и заполнена нейтральным газом. Предусмотрена очистка среды от окислов.

В настоящее время совместно с ВНИИМ проводится работа по аттестации и исследованию установки. По предварительным результатам, установка имеет относительную погрешность измерения до 1% . Температура измеряемой среды $450 \pm 5^\circ \text{C}$ [5, 6].

4. Спроектирована и изготовлена расходомерная установка на каменноугольную смолу, основанная на весовом методе измерения. Расчетная погрешность установки $0,5\%$. Температура измеряемой среды до $150 \pm 5^\circ \text{C}$. Диапазон измерения $0 + 20$ л³/ч.

Создание и аттестация установки проводится совместно с ВНИИК [2, 3].

5. Институт имеет техническое задание и ведет разработку расходомерной установки на цемент и сыпучие материалы, которая впервые проектируется в СССР. Она предназначена для тарировки массовых расходомеров сыпучих строительных материалов для пневмотранспортных магистралей в промышленности строительных материалов.

Технические требования к установке следующие:

непрерывный расход от 0,05 до 10 т/ч, скорость перемещения среды на измерительном участке $0,6 \div 0,8$ м/сек,

скорость перемещения воздуха $5 \div 35$ м/сек, погрешность измерения расхода не должна превышать 0,5%.

Учитывая трудности, возникающие при проектировании расходомерных установок большой производительности для испытания и поверки индукционных расходомеров, на d_y свыше 80 мм, в институте разработан метод беспроливной градуировки этих приборов [4].

Беспроливной метод градуировки и поверки индукционных расходомеров основан на сочетании электрического моделирования и поэлементной поверки датчика расхода. Разработан комплекс аппаратуры, позволяющей проводить беспроливную градуировку и поверку индукционных расходомеров класса 2,5 и выше.

Кроме того, учитывая сложность создания расходомерных станций для поверки приборов, работающих на взрывоопасных, агрессивных и токсичных средах (желтый фосфор, хлорная кислота, четыреххлористый титан и др.), а также большое разнообразие физических свойств этих сред, институт использует методику пересчета характеристик турбинных расходомеров с воды на среды с различными вязкостями и плотностями. Сущность метода заключается в экспериментальном исследовании моментов сопротивления, не зависящих от физических параметров жидкости у конкретного прибора, и расчетном определении сил гидравлических моментов и сопротивлений с обычной в гидродинамике точностью для жидкости, на которую должен быть отградуирован прибор.

При гидравлических расчетах используется теория пограничного слоя, согласно которой течение в межлопастных каналах турбины разбивается на две области: течение в тонком пограничном слое около стенки, где силы трения значительны, и течение вне пограничного слоя, в котором силами трения вследствие их малости можно пренебречь и поэтому с большой степенью точности применить закономерности теории идеальной жидкости. Расчет гидравлических моментов производится с учетом толщины лопастей и радиального зазора между лопастями турбины и корпусом.

Из сил сопротивления вычисляется дисковое трение по торцам втулки турбины.

Экспериментальная проверка методики показала сходимость расчетов с экспериментом не ниже 1%. Проверка проводилась на хлорной кислоте, расплавленной сере, желтом фосфоре и четыреххлористом титане.

Однако следует отметить, что имеющиеся комплексы установок не обеспечивают нужд и потребностей приборостроительной промышленности, сдерживают создание высокоточных датчиков расхода и количества веществ.

Следовательно, для возможно быстрого решения научных задач в области измерения расхода необходимо:

1. Резко расширить масштаб работ расходомерных лабораторий в метрологических институтах Комитета стандартов, мер и измерительных приборов.

2. Аттестовать расходомерные установки, имеющиеся на заводах-изготовителях, в научно-исследовательских институтах и конструкторских бюро.

3. Разработать контрольные устройства и образцовые приборы для поверки расходомеров, находящихся в эксплуатации на предприятиях-потребителях.

4. Разработать методики поверки расходомеров, предназначенных для эксплуатации на различных средах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кремлевский П. П. Измерение расходов и количеств жидкости, газа и пара. НТО. М., 1964.

2. Павловский А. Н. Измерение расхода и количества жидкостей газа и пара. М., 1967.

3. Труды II научно-технической конференции. Методы и приборы для измерения расходов и количеств жидкости, газа и пара. М., 1967.

4. Вельт И. Д. Разработка метода и создание комплекса устройств для градуировки электромагнитных расходомеров без натуральных испытаний на потоке жидкости. М., 1967.

5. Перельман Р. Г. Проектирование и эксплуатация жидкометаллических систем. М., Атомиздат, 1968.

6. Таршин М. С. Контроль гидравлических сопротивлений. М., Машиностроение, 1966.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ РАСХОДА ЖИДКОСТИ ПРИ ПОМОЩИ ДИФМАНОМЕТРОВ-РАСХОДОМЕРОВ

Для промышленных измерений расхода жидкостей, газов и паров, протекающих по закрытым трубопроводам, применяются преимущественно дифманометры в комплекте с сужающими устройствами (дифманометры-расходомеры).

Несмотря на то, что другие методы измерений расхода, основанные на различных физических принципах, за последние годы получили дальнейшее развитие, дифманометры-расходомеры благодаря своей сравнительной простоте, экономичности и универсальности все еще остаются основным общепромышленным средством для измерения расхода. Это относится как к СССР, так и к зарубежным странам [1, 2]. Например, в Англии, по данным д-ра Спенсера [2], среди всех находящихся в эксплуатации расходомеров 90% приходится на долю дифманометров. Вот почему во всех промышленно развитых странах с неослабевающей интенсивностью продолжают исследования, направленные на повышение точности измерений расхода с помощью дифманометров.

Уравнение расхода при установке в трубопроводе сужающего устройства имеет вид

$$Q = C \alpha \varepsilon d^2 \Delta p^{1/2} \rho^{-1/2}, \quad (1)$$

где Q — объемный расход;

C — константа;

α — коэффициент расхода;

ε — поправочный множитель на расширение измеряемой среды (для жидкостей $\varepsilon = 1$);

d — диаметр отверстия сужающего устройства при температуре измеряемой среды;

Δp — перепад давления в сужающем устройстве;

ρ — плотность измеряемой среды в рабочих условиях.

При определении массового расхода показатель степени при ρ в уравнении (1) заменяется на $+1/2$.

Для оценки погрешности измерений коэффициент расхода может быть приближенно представлен как линейная функция квадрата модуля $m = \left(\frac{d}{D}\right)^2$ сужающего устройства [3]:

$$\alpha \approx a + 0,5 \frac{d^4}{D^4}, \quad (2)$$

где a — постоянная величина;

D — внутренний диаметр трубопровода перед сужающим устройством при температуре измеряемой среды.

После подстановки выражения (2) в уравнение (1) и определения частных производных Q по каждой из переменных величин* получим следующую формулу для вычисления средней квадратичной относительной погрешности измерения расхода:

$$\sigma_Q = \left[\sigma_\alpha^2 + \sigma_i^2 + \left(\frac{2m^2}{\alpha} \right)^2 \sigma_D^2 + 4 \left(1 + \frac{m^2}{\alpha} \right) \sigma_d^2 + \frac{1}{4} \sigma_{\Delta p}^2 + \frac{1}{4} \sigma_p^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где индексами при σ обозначены соответствующие измеряемые величины согласно выражениям (1) и (2).

Формула (3) включена в рекомендацию ИСО № 541 [3].

Проанализируем аналогичные формулы для вычисления погрешности измерения расхода, приведенные в некоторых национальных стандартах или эквивалентных им нормативных документах (здесь и далее будут рассматриваться Правила 28—64 [4], стандарт Англии [5] и проект стандарта ФРГ [6], выпущенные приблизительно в одно и то же время**).

В Правилах 28—64 формула погрешности содержит все слагаемые правой части формулы (3), за исключением четвертого, которое отброшено, как пренебрежимо малое при принятых жестких требованиях к величине α . Кроме того, первое и третье слагаемые объединены в один член, характеризующий погрешность коэффициента расхода.

Стандарт ФРГ исходит из того, что значения d и D известны без погрешности, в связи с чем третье и четвертое слагаемые формулы (3) отброшены. Однако это представляется неправомерным по отношению к третьему слагаемому, поскольку оно учитывает не только погрешность измерения диаметра трубопровода, но и допустимые его отклонения ($\pm 0,3\%$) от среднего значения.

Формула, приведенная в английском стандарте, аналогична по структуре формуле (3), но коэффициенты при третьем и четвертом членах иные, так как дифференцирование производилось в предположении, что коэффициент расхода не зависит от модуля сужающего устройства. Однако подобное упрощение едва ли оправдано.

Для определения погрешности коэффициента расхода в СССР и Англии приняты идентичные выражения, основанные на квадратичном суммировании отдельных частных погрешностей.

Соответствующее выражение, содержащееся в английском стандарте, может быть представлено в виде функций следующих величин:

$$\sigma_\alpha = [f_1^2(m) + f_2^2(m, Re) + f_3^2(m, D)]^{1/2}. \quad (4)$$

В формуле (4) первый член характеризует погрешность исходного коэффициента расхода, второй и третий — погрешности поправочных множителей на влияние числа Рейнольдса и шероховатости трубопровода.

Аналогичное выражение в Правилах 28—64 имеет вид:

$$\sigma_\alpha = [f_4^2(m, Re) + f_5^2(m, D) + f_6^2(m, D) + f_7^2(m, \alpha) + 0,15^2]^{1/2}. \quad (5)$$

* Влиянием температуры на величины D и d , как показывают расчеты, здесь можно пренебречь.

** В нормативном документе США [7] не приводится формула для подсчета погрешности измерения. Стандарты Франции и Италии устарели и в настоящее время пересматриваются.

Здесь первые два члена те же, что первый и третий в выражении (4). Остальные члены учитывают: третий — влияние неостроты кромки, четвертый — влияние отклонения диаметра трубопровода от номинального значения и пятый — неточность поверки на влияние числа Рейнольдса [8, 9].

Рекомендация ИСО и стандарт ФРГ дают выражение для погрешности коэффициента расхода в следующем виде:

$$\sigma_x = 0,25 + Am^2 + f_8(k/D, m, Re) + f_9(m, Re) + f_{10}(D), \quad (6)$$

где A — коэффициент, зависящий от рода сужающего устройства;

k — шероховатость внутренней поверхности трубопровода.

Сравнивая формулы (4) — (6), прежде всего замечаем принципиальное отличие формулы (6), в которой частные погрешности суммируются арифметически. Кроме того, погрешность, обусловленная шероховатостью трубопровода, определяется (см. третий член в формуле) параметром, зависящим как от относительной шероховатости k/D , так и от числа Рейнольдса. Непосредственное влияние этого числа учитывается четвертым членом. Имеется также член, отражающий влияние диаметра трубопровода.

Необходимо подчеркнуть, что величина k в том виде, как она представлена в работе [3], является весьма неопределенным параметром, и это может существенно сказаться на численном значении коэффициента расхода и на его погрешности. В связи с этим следует установить более четкий и определенный способ выражения величины k с тем, чтобы она однозначно характеризовала шероховатость поверхности трубопровода.

Рассматривая вопрос о погрешностях коэффициента расхода, важно отметить, что ни в литературе, ни в официальных материалах Технического комитета ИСО/ТК 30 до настоящего времени не опубликованы результаты экспериментальных исследований, на основании которых получены рекомендуемые ИСО/ТК 30 значения коэффициента расхода и их погрешности. Публикация таких сведений позволила бы при разработке соответствующих стандартов критически рассмотреть эти материалы и сравнить их с национальными данными.

Это тем более необходимо, что основные эксперименты по диафрагмам и соплам проводились, как известно, доктором Витте, который применял весьма несовершенную методику обработки экспериментальных данных [10]. Для данного модуля сужающего устройства выполнялось несколько серий опытов при различных числах Рейнольдса и разных диаметрах трубопровода. Для каждой серии опытов проводилась средняя кривая, а по всем средним кривым — одна общая (нормальная), справедливая для данного модуля и разных диаметров трубопровода. Погрешность найденных значений коэффициента расхода принималась равной наибольшему отклонению средних кривых от общей кривой. Более того, как вытекает из примечаний к проекту стандарта ФРГ, приведенная выше формула (6) не является результатом статистической обработки опытных данных.

Весьма важен также вопрос, касающийся погрешности измерения расхода при недостаточной длине прямых участков трубопровода, примыкающего к сужающему устройству.

Согласно Рекомендации ИСО, погрешность, обусловленная короткими прямыми участками, арифметически суммируется с удвоенной средней квадратичной погрешностью измерения расхода, вычисленной по формуле (3). В стандартах Англии и ФРГ упомянутая погрешность арифметически суммируется с погрешностью коэффициента расхода.

Обе системы, по нашему мнению, недостаточно правомерны, поскольку погрешность коэффициента расхода от недостаточной длины трубопровода, являясь для конкретной измерительной установки систематической погрешностью, вместе с тем по своему характеру ничем не отличается, например, от погрешностей, связанных с влиянием диаметра и шероховатости трубопровода (все эти погрешности неизвестны ни по величине, ни по знаку; мы знаем лишь их предельные значения).

Кроме того, введенная в Англии и ФРГ система неправильна и потому, что полученная арифметическая сумма случайной и систематической погрешностей должна вводиться в квадрате под корень выражения (4) или (3). Исходя из изложенного, более обоснованным представляется квадратичное суммирование рассматриваемой погрешности с другими частными погрешностями коэффициента расхода, как это принято в Правилах 27—54 [11].

Определенное влияние на точность измерения расхода газов и паров оказывает (см. формулу (3) поправочный множитель ε . Средняя квадратичная погрешность этого множителя в Рекомендации ИСО, стандарте ФРГ и Правилах 28—64 определяется как отношение $V \frac{\Delta p}{p}$, где p — давление газа и коэффициент V зависят от рода и модуля сужающего устройства*, в то время как в стандарте Англии эта погрешность для всех сужающих устройств составляет $33(1-\varepsilon)\%$.

Как видим, и в данном вопросе нет единого подхода.

При оценке погрешности измерения расхода для ряда величин, входящих в уравнение расхода (перепад давления, плотность и др.), известны только максимальные погрешности однократного измерения. Если считать, что погрешности в этом случае распределяются по закону равной вероятности, то среднюю квадратичную погрешность можно приближенно приравнять половине максимальной погрешности (или класса точности прибора). Именно такая система принята в Рекомендации ИСО, Правилах 28—64 и стандарте Англии.

Однако, как показал соответствующий анализ, больше оснований существует к тому, чтобы считать распределение упомянутых погрешностей нормальным (гауссовым) и, следовательно, определять среднюю квадратическую погрешность как $1/3$ максимальной погрешности однократного измерения.

Выводы

Для устранения отмеченных расхождений в национальных стандартах и Рекомендации ИСО требуется уточнение ряда положений, относящихся к оценке погрешности автоматического измерения расхода при помощи сужающих устройств. Это уточнение должно основываться на результатах новых теоретических и экспериментальных исследований в сочетании с анализом ранее выполненных работ.

В частности, особое внимание следует уделить:

- структуре и составу формулы для вычисления погрешности коэффициента расхода;
- погрешности исходного коэффициента расхода;
- параметру, определяющему погрешность от неостроты кромки диафрагмы;
- влиянию шероховатости трубопровода;

* О путях снижения этой погрешности см. статью [12].

способу учета погрешности от недостаточной длины прямых участков трубопровода;
оценке погрешности величин, измеряемых однократно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Muller E. Hinton R. B. The Measurement of Flow by Orifice Plate. „Instrument Review“, 1965, 12, No 168.
2. Spencer E. A. Flow Measurement at the National Engineering Laboratory. „Process Engineering“, 1968, Aug.
3. Recommendation ISO R541. Mesure de débit des fluides au moyen des diaphragmes et des tuyères, 1967.
4. Правила 28—64. Измерения расхода жидкостей, газов и паров стандартными диафрагмами и соплами. М., Изд-во стандартов, 1965.
5. B. S. 1042: Part 1: 1964. Methods for the Measurement of Fluid Flow in Pipes. Part 1. Orifice plates, nozzles and Venturi tubes.
6. DIN 1952 (Entwurf). Durchflußmessung mit genormten Düsen, Blenden und Venturidüsen (VDI-Durchflußmeßregeln), 1963.
7. PTC 19.5; 5—1959. Supplement to ASME Power Test Codes. Chapter 4—Flow Measurement. Part 5—Measurement of Quantity of Materials, 1959.
8. Вайнштейн А. Л. „Измерительная техника“, 1959, № 6.
9. Кивилис С. С. „Измерительная техника“, 1965, № 6.
10. Jorissen A. „Trans. ASME“, 1953, № 7.
11. Правила 27—54. По применению и поверке расходомеров с нормальными диафрагмами, соплами и трубами Вентури. М., Изд-во стандартов, 1966.
12. Гафанович М. Д. „Измерительная техника“, 1967, № 7.

МАССОВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ СЫПУЧИХ И ПУЛЬПОВИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИХ ПОВЕРКИ

Разработка и совершенствование методов и средств автоматического контроля расхода сыпучих и пульповидных материалов является актуальной задачей для многих отраслей промышленного производства.

В настоящее время созданы различные системы автоматического контроля нестационарных потоков [1, 2], однако в большинстве своем они предназначены для контроля потоков чистых жидкостей и газов. Для пульповидных материалов практически отсутствуют приборы автоматического контроля весового (массового) расхода, а для контроля сыпучих материалов в различных отраслях промышленности наиболее распространены конвейерные весы и ленточные дозаторы различных систем. Анализ состояния техники измерения расходов сыпучих и пульповидных материалов, например, в промышленности строительных материалов показывает, что существующие приборы во многих случаях не соответствуют условиям эксплуатации даже при наличии удовлетворительных метрологических характеристик. Измерение массового расхода сильно аэрированных потоков цемента, сырьевой муки, пылевидного топлива не может производиться существующими стандартными средствами и требует специальных разработок.

В ряде отраслей промышленности до сих пор отсутствуют средства периодического контроля, не говоря уже о непрерывных измерителях и дозаторах количества и расхода сыпучих и пульповидных материалов. Поэтому задача создания универсальных как по конструктивной преемственности, так и по основным технико-эксплуатационным характеристикам расходомеров для сыпучих и пульповидных сред оправдана состоянием этого вида техники.

Автоматические расходомерные устройства для пульповидных и сыпучих сред должны сочетать в себе механизм для непрерывного взвешивания материала и технику регулирования, позволяющую выполнять одну или несколько последовательных операций:

- а) весовой контроль текущих значений расхода материала и интегральные показания;
- б) поддержание в технологическом процессе заданного расхода;
- в) получение заданных пропорций при смешивании материалов.

В основу разработки расходомеров и стендового оборудования для исследовательских работ положен принцип измерения массового расхода вещества по крутящему моменту, создаваемому движущим-

ся в свободном потоке материалом на валу, вращающемся с постоянной скоростью, лопастного потокочувствительного элемента [3].

На рис. 1 представлена кинематическая схема разработанной конструкции массового расходомера типа РМ. Потокочувствительный элемент 1 представляет собой диск с радиально расположенными лопастями.

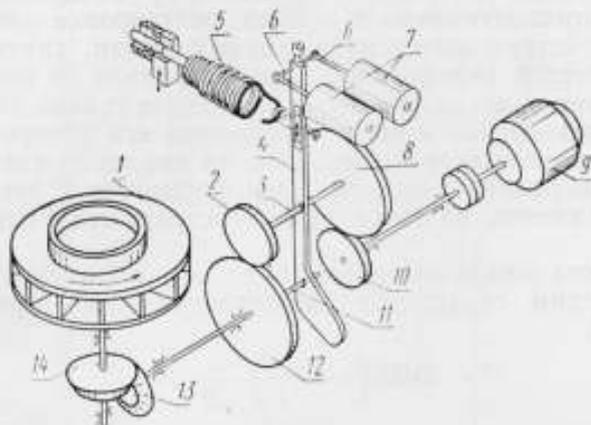


Рис. 1. Кинематическая схема массового расходомера типа РМ.

Зависимость крутящего момента M на валу потокочувствительного элемента от величины массового расхода имеет вид [4]

$$M = G\omega R^2, \quad (1)$$

где G — массовый расход материала;

ω — угловая скорость потокочувствительного элемента;

R — радиус потокочувствительного элемента.

Из формулы (1) следует, что результирующий крутящий момент пропорционален полному расходу измеряемого материала через потокочувствительный элемент заданного радиуса при постоянной скорости вращения.

Геометрия потокочувствительного элемента и количество лопастей были выбраны на основании специальных исследований, в программу которых положены вопросы воспроизводимости статической характеристики пропускной способности для широкого диапазона плотностей контролируемых сред, эксплуатационной надежности и др.

Для преобразования момента M в конструкции расходомера использован несимметричный двухступенчатый планетарный редуктор. Потокочувствительный элемент 1 приводится во вращение с постоянной скоростью от двигателя 9 через шестерни 10, 8, 2 и 12 планетарного редуктора и шестерни 13 и 14 промежуточной конической пары.

От вала электродвигателя 9 через шестерню 10 движение передается шестерне 8, вал 3 которой установлен в подшипниках водила 4. На другом конце вала 3 установлена шестерня 2, которая через шестерню 12 и через промежуточную коническую пару (шестерни 13 и 14) передает движение потокочувствительному элементу 1.

Так как водило 4 установлено в подшипниках на консоли вала 11, то вал 3 вместе с шестернями 2 и 8 может поворачиваться относительно оси вала 11.

В данной измерительной схеме прибора крутящий момент через звеня планетарного редуктора преобразуется в усилие, приложенное к водилу, и вызывает его поворот относительно оси 11. Конец водила связан с измерительной пружиной 5, имеющей устройство предварительного натяжения и точной регулировки плеча приложения противодействующего усилия. Таким образом, крутящий момент M преобразуется в перемещение водила. Водило 10 поворачивается и останавливается, когда противодействующее усилие измерительной пружины 5 уравновесит момент, вызвавший его поворот.

При повороте водила 4 перемещается шарнирно связанный с ним сердечник 6 дифференциального трансформатора 7 для дистанционной передачи сигнала на вторичный регистрирующий или регулирующий прибор.

Зависимость между моментом H на валу потокочувствительного элемента и ходом сердечника дифференциального трансформатора имеет вид [4]:

$$H = G\omega R^2 \left(1 - \frac{1}{i}\right) \frac{l_2}{pl_1^2}, \quad (2)$$

где i — передаточное отношение планетарного редуктора;
 p — жесткость измерительной пружины;
 l_1 — плечо приложения противодействующего усилия пружины;
 l_2 — расстояние от оси поворота водила до плунжера дифференциального трансформатора.

Если обозначить

$$k = \omega R^2 \left(1 - \frac{1}{i}\right) \frac{l_2}{pl_1^2},$$

то выражение (2) можно переписать в виде

$$H = kG. \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что ход сердечника дифференциального трансформатора является линейной функцией массового расхода, так как величины, определяющие коэффициент k , постоянны и характеризуют конструктивные параметры прибора.

В комплекте с расходомером можно использовать любой тип вторичного прибора, работающего по компенсационной схеме с дифференциальными трансформаторами.

С целью проведения метрологических исследований массовых расходомеров типа РМ при натурном проливе контролируемой среды во Всесоюзном научно-исследовательском проектно-конструкторском институте автоматизации предприятий промышленных строительных материалов (ВИАСМ) разработаны расходомерные установки для жидких (с возможностью работы на пульсах) и сыпучих материалов. Установки — циркуляционного типа, они основаны на весовом методе измерения контрольных порций с регистрацией времени прохождения потока через исследуемый расходомер при равномерном истечении.

Установка для жидких сред построена по типовой схеме (рис. 2).

Основными элементами установки являются бак постоянного уровня 1, из которого рабочая жидкость через регулировочное устройство 2 подводится к испытуемому расходомеру 3, затем к

измерительной емкости 4. После взвешивания на весах 5 жидкость сливается в резервуар 6, откуда насосом 7 перекачивается в бак 1. В комплект установки входят также перекидное устройство 8, пульт контроля и управления 9, на котором установлены вторичный прибор расходомера 10 и электронный секундомер 11.

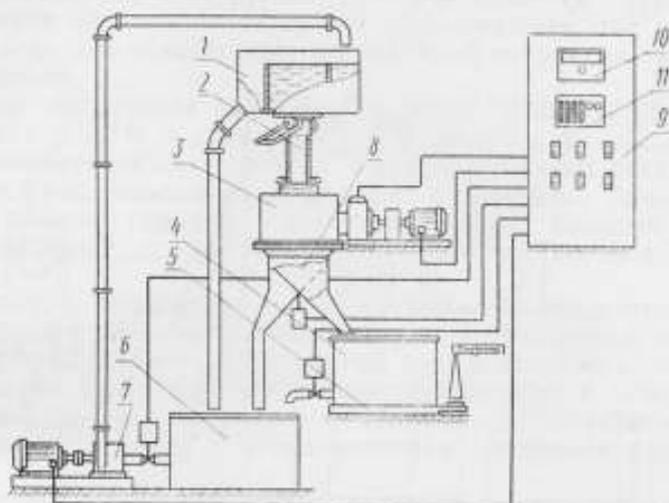


Рис. 2. Принципиальная схема расходомерной установки для жидких материалов.

В качестве регулировочного устройства для установки заданного расхода материала на испытательном участке используется набор сменных калиброванных патрубков.

Установка имеет следующие технические характеристики: предел измерения 100 *т/ч*, класс точности — 0,5, основная рабочая среда — вода, контрольные среды — пульпы с влажностью не ниже 35%.

Питание электрических цепей установки осуществляется от сети трехфазного тока напряжением 380 *в* и частотой 50 *гц*.

Максимальная потребляемая мощность механизмами до 45 *квт*, управление — дистанционное с пульта управления.

Расходомерная установка 4 для сыпучих материалов работает также по весовому методу и по принципу построения аналогична гидравлической (рис. 3).

Отдельные особенности установки определяются работой на сыпучих средах. В качестве питающего устройства применена демпфирующая емкость 2, после которой установлен специальный питатель 3 с устройством плавного изменения проходного сечения. Нижняя часть емкости в районе выхода материала имеет аэрирующие пластины для повышения сыпучести таких материалов, как цемент и др. В верхней части емкости расположен переливной карман для отвода избыточного материала. Избыток материала направляется в сборный бункер 7, который выполняет функции пролетной емкости.

В качестве транспортирующих устройств для подачи материала из сборного бункера 7 к питателю используется нижний шнек 9, ковшовый элеватор 8 и верхний шнек 1. Производительность шнеков

можно регулировать с помощью сменных шестерен, установленных между шнеком и редуктором привода.

Измерительный бункер 6 предназначен для сбора контрольной порции материала, прошедшей через испытательный участок. Бункер установлен на платформенные лирные весы 10 с отношением плеч

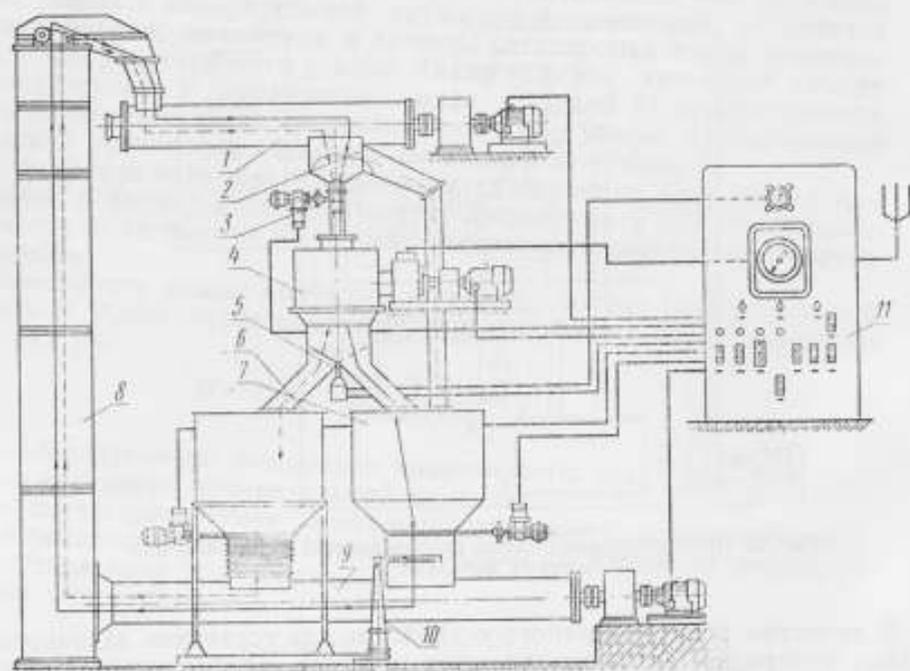


Рис. 3. Принципиальная схема расходомерной установки для сыпучих материалов.

1/100 от 150 до 3000 кг. С нижним шнеком бункер сочленен гофрированным брезентовым переходом. При открытии шибера материал из измерительного бункера поступает в нижний шнек. Для направления материала после испытательного участка в измерительный бункер 6 или в сборный бункер 7 используется перекидное устройство 5. Для работы на материалах с плохой сыпучестью все транспортирующие тракты и точки бункеров снабжены специальной системой аэрации.

В качестве измерителя времени в установке использован электронный секундомер-калибратор типа СК1Н. Погрешность измерения времени на множитель „ $\times 100$ “ составляет 0,01%. Управление механизмами установки осуществляется с пульта 11.

Исследование и аттестация расходомерных установок показали, что погрешность измерения расхода на установке для пудловидных сред (максимальный расход 100 т/ч) не превышает $\pm 0,5\%$, на установке для сыпучих сред (максимальный расход 80 т/ч) — 0,7%.

Широкая программа экспериментального исследования различных моделей и типоразмеров массовых расходомеров была выполнена на разработанных расходомерных установках.

В 1968 г. опытные образцы приборов прошли государственные испытания лаборатории измерения расходов ВНИИК. На испытания были представлены приборы трех типоразмеров, охватывающие пре-

делы измерения от 3,2 до 125 *т/ч*. Проверка основной погрешности осуществлялась при работе расходомеров на следующих материалах: вода, известковый шлам различной влажности, песок и молотый керамзит. Государственные испытания установили соответствие выполненной разработки техническим требованиям и условиям эксплуатации. Разработанная конструкция приборов является универсальной с точки зрения использования как на пульповидных, так и на сыпучих материалах для безнапорных магистралей и трактов транспортировки материала.

Основная допустимая погрешность всех типоразмеров прибора не превышает $\pm 2,5\%$ в диапазоне от 20 до 100% шкалы.

В производственных условиях опытные образцы расходомеров испытывались на различных агрегатах цементного производства: цементе, угольном порошке, сланцевом топливе, пыли, осажденной в электрофильтрах, и шламах различного химического состава и плотности.

Расходомеры были включены в системы автоматического регулирования подачи материала в качестве датчиков расхода и успешно эксплуатируются на ряде предприятий промышленности строительных материалов. Например, для питания вращающихся печей шламом в институте ВИАСМ разработана установка автоматического дозирования типа КРШ [5—7] с использованием массового расходомера типа РМ.

При построении систем автоматического управления процессами загрузки и питания с использованием расходомеров новой разработки в качестве питателей могут быть использованы любые исполнительные органы, хорошо работающие на контролируемых средах (шнеки, вибропитатели, дисковые и ячейковые питатели, задвижки, пережимные вентили и др.).

Так как расходомеры типа РМ не предназначены для работы на участках технологических линий, где контролируемый материал транспортируется под давлением, то это накладывает некоторое ограничение на область их применения.

Дальнейшее развитие работ в области массовых расходомеров для пульповидных и сыпучих сред целесообразно вести в следующих направлениях:

разработка методов и средств, повышающих надежность и точность измерений массовых расходомеров для безнапорных магистралей;

расширение пределов измерения как в области малых расходов, так и для расходов, превышающих 200—250 *т/ч*;

разработка, исследование и аттестация косвенных методов градуирования и поверки приборов с целью отказа от громоздких и дорогостоящих расходомерных установок, основанных на методе прямого измерения;

разработка и исследование методов и устройств для модуляции потока контролируемой среды по заданной программе (на расходомерных установках) для возможности экспериментального исследования расходомеров в режиме пульсирующих потоков и получения воспроизводимых динамических характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кремлевский П. П. Расходомеры. М., Машгиз, 1963.
2. Катус Г. П. Системы автоматического контроля полей скоростей и расходов. М., «Наука», 1965.

3. Дворкин Л. С., Кос Ю. Ю. Массовый расходомер. Авторское свидетельство СССР, № 160848, 1963.

4. Кос Ю. Ю., Дорнин Л. А. Массовый расходомер сыпучих и пульвовидных материалов. В сб. трудов ВИАСМ „Автоматизация производства строительных материалов“, вып. 1, Л., Стройиздат, 1967.

5. Учитель М. М., Кос Ю. Ю., Дворкин Л. С. Способ непрерывного автоматического контроля и регулирования процесса загрузки пульвой (шламом), например, вращающейся цементной печи. Авторское свидетельство СССР, № 159758, 1963.

6. Кос Ю. Ю. Установка непрерывного автоматического контроля и регулирования весовой загрузки шламом вращающейся печи. В сб. трудов ВИАСМ „Автоматизация производства строительных материалов“, вып. 1, Л., Стройиздат, 1967.

7. Кос Ю. Ю. Оценка погрешности массового расходомера типа РМ. В сб. трудов ВИАСМ „Автоматизация производства строительных материалов“, вып. II, Л., Стройиздат, 1968.

8. Павловский А. Н. Измерение расхода и количества жидкостей, газа и пара. М., Изд-во стандартов, 1967.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В РАЗВИТИИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ГИДРОСМЕСИ И ТВЕРДОГО ПРИ НАПОРНОМ ГИДРОТРАНСПОРТЕ

Попытки создания системы учета твердого в напорном гидротранспорте, предпринятые различными организациями, базировались на системе, реализующей выражение:

$$V_{тв} = \int_{t_1}^{t_2} Q_{см} \varphi dt - \text{объем твердого;}$$

$$M = \int_{t_1}^{t_2} Q_{см} \varphi \rho_{тв} dt - \text{масса твердого,}$$

где $Q_{см}$, φ и $\rho_{тв}$ — соответственно расход смеси, консистенция смеси и плотность твердого являются функциями времени.

В большинстве схем консистенция, представляющая собой отношение объема твердого к объему гидросмеси, измеряется косвенно по плотности гидросмеси в соответствии с известным соотношением:

$$\varphi = \frac{\rho_{см} - \rho_{ж}}{\rho_{тв} - \rho_{ж}},$$

где $\rho_{см}$, $\rho_{ж}$ и $\rho_{тв}$ — соответственно плотность гидросмеси, жидкой и твердой фаз.

В определении объема и веса твердого участвуют четыре параметра $Q_{см}$, $\rho_{см}$, $\rho_{ж}$, $\rho_{тв}$. Первые два могут автоматически измеряться приборами (расходомером, плотномером) во времени.

Плотность жидкости и твердого в потоке гидросмеси измерить невозможно. Однако, так как плотность зависит от температуры, ее можно заменить измерением температуры гидросмеси, а измерение веса и объема твердого указанным способом возможно только при постоянной и известной его плотности.

Влияние изменения плотности твердого против расчетного определяется формулой

$$\delta_{\varphi} = \frac{\rho'_{тв} - \rho_{тв}}{\rho_{тв} - \rho_{ж}},$$

где $\rho'_{тв}$ — фактическая плотность;

$\rho_{тв}$ — расчетная плотность.

Ошибка резко возрастает при приближении плотности твердого к плотности жидкости. Это особенно важно при измерении расхода легкого твердого, например, угля.

Голландская фирма Alto измеряла объемный расход твердого с применением кондуктометрического консистомера и получила снижение погрешности определения консистенции. Однако оставалась значительная ошибка от влияния воздуха в потоке гидросмеси [1].

Для исключения влияния изменения плотности твердого и насыщения гидросмеси воздухом на измерение расхода твердого может быть предложен метод, основанный на объединении трех приборов — расходомера, плотномера и консистомера.

В этом случае

$$M_{\text{тв}} = \int_{t_1}^{t_2} Q_{\text{см}} [(\rho_{\text{см}} - \rho_{\text{ж}}) + \rho_{\text{ж}} \varphi] dt. \quad (1)$$

Все величины здесь автоматически измеряются во времени, а неизмеряемая плотность твердого исключена. Однако вследствие того что плотность воздуха равна $1,29 \text{ кг/м}^3$, т. е. в 1000 раз меньше плотности твердого, ею можно пренебречь.

Погрешность устройства, выполняющего арифметические операции, может быть сделана достаточно малой, поэтому при анализе ошибки метода она нами не учитывается. Поскольку погрешность каждого из приборов включает в себя систематическую и случайную части, то и суммировать их нужно по-разному.

Погрешность метода представим в виде выражения

$$\delta_m = \delta_0 \frac{M_m}{M} + \delta_k + \sqrt{\left(3\sigma_0 \frac{M_m}{M}\right)^2 + (3\sigma_k)^2}, \quad (2)$$

где δ_0 — часть систематической погрешности, приведенная к диапазону;

δ_k — погрешность коэффициента преобразования прибора;

σ_0 — часть случайной погрешности, приведенная к диапазону;

σ_k — случайная погрешность коэффициента преобразования прибора.

Эта зависимость может быть аппроксимирована прямой 4 (рис. 1):

$$\delta = A \frac{M_m}{M} + B, \quad (3)$$

что и выражает относительную погрешность прибора.

Здесь

$$A = \delta_0 + 3\sigma_0,$$

$$B = \delta_k + \sqrt{(3\sigma_0)^2 + (3\sigma_k)^2} - 3\sigma_0.$$

Для потребителей, использующих каждый прибор в отдельности, погрешность будет достаточно нормировать общей формулой

$$\delta_x = A \frac{x_m}{x} + B. \quad (4)$$

Чтобы установить погрешность комплекса приборов, предназначенных для учета твердого, такого выражения погрешности недостаточно. Необходимо каждый прибор, входящий в комплекс измерения, проанализировать по предлагаемой схеме, т. е. установить составляющие погрешности:

$$\delta_0, \sigma_0, \delta_k, \sigma_k.$$

По этой схеме необходимо проанализировать как основную погрешность, так и влияние всех факторов внешней и измеряемой среды, т. е. дополнительные погрешности.

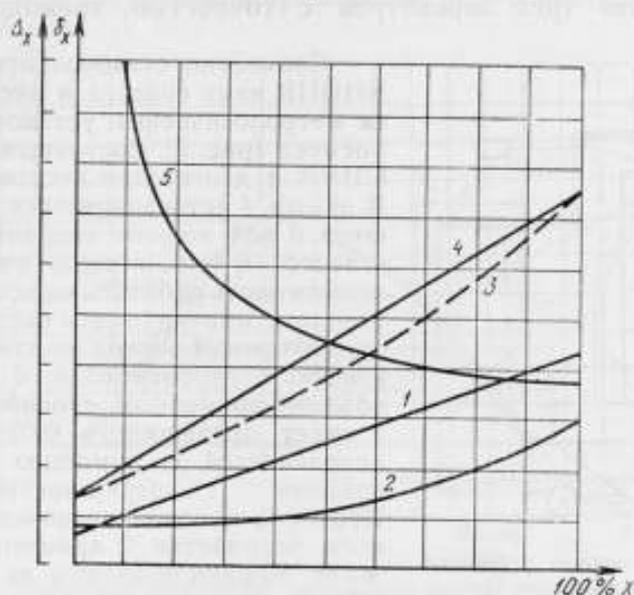


Рис. 1. Нормированная погрешность прибора.
 1 — систематическая погрешность $\Delta_0 + \Delta_x$; 2 — случайная погрешность $\sqrt{(3\sigma_0)^2 + (3\sigma_x)^2}$; 3 — суммарная абсолютная погрешность; 4 — нормированная абсолютная погрешность; 5 — нормированная относительная погрешность.

Естественно ожидать, что часть погрешностей отдельных приборов будет взаимно коррелирована, поэтому общая погрешность метода измерения количества твердого будет образовываться как многомерная случайная величина.

Проведенный нами анализ приборов, которые могут быть применены для учета твердого, поставил следующие задачи:

1) расход гидросмеси должен замеряться индукционным расходомером. Благодаря проводимым в последние годы работам по улучшению характеристик этого прибора он становится наиболее точным для измерения расхода гидросмеси. Предлагаемые рядом авторов трубы Вентури с отборниками давления различных конструкций не могут обеспечить достаточную точность учета твердого;

2) консистенция гидросмеси может измеряться кондуктометрическим консистомером, созданным во Всесоюзном научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте добычи угля гидравлическим способом (ВНИИГидроуголь);

3) плотность гидросмеси желательно измерять дифференциально, т. е. получать сразу превышения плотности гидросмеси над плотностью жидкости.

Из приборов, выпускаемых промышленностью, наиболее подходящим является радиоактивный плотномер (ПЖР-5, ПР-1024). Однако в нем необходимо предусмотреть дополнительную температурную компенсацию и разработать средства и методы калибровки по гидросмеси.

Работы, проводимые во ВНИИГидроуголь, направлены на решение перечисленных задач. Для создания и исследования такого комплекса приборов необходима метрологическая база, которая обеспечит измерение трех параметров с точностью, превышающей требуемую.

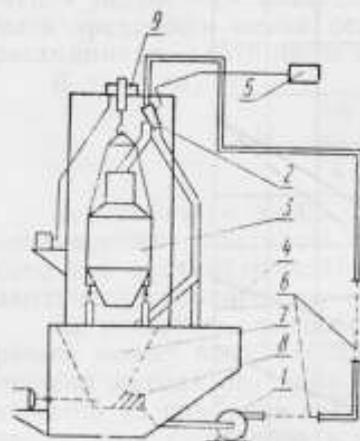


Рис. 2. Расходомерная установка.

Совместно с лабораторией расхода ВНИИК нами создана и эксплуатируется метрологическая установка на гидросмеси (рис. 2), состоящая из углесоса 8ШНВ с двигателем постоянного тока. В зумпф 4 устанавливается бункер 7 и шнек 8 для подачи твердого ко всасу углесоса 1. Это, в свою очередь, дает возможность работать на искусственном твердом, имитирующем различную среду. Объемный расход на измерительных участках трубопровода 6 замеряется объемно-временным способом. Мерник 3 имеет погрешность 0,03%, а время определяется с помощью измерителя времени 5 с погрешностью 10 м/сек. Переброс потока при помощи перекидного устройства 2 производится за 40 м сек. Мерник подвешен на весах 9 типа ОГВ-2.

Для уменьшения случайной ошибки сличения среднего расхода нами предложено интегральное сличение показаний расходомера с показаниями установки. Для этой цели разработан интегратор на базе преобразователя постоянного тока в частоту с последующим счетом импульсов.

Применение такого метода позволило правильно оценить интегральную погрешность расходомера, которая сводится к следующему.

Относительная погрешность измерения объема принимается систематической и равной погрешности мерника — 0,03%. Максимальная ошибка измерения времени вызвана неточностью установки выключателя перекидного устройства. Для определения этой ошибки проводилось статистическое исследование времени переброса при различных режимах установки и определялся характер движения перекидного устройства с помощью скоростной киносъемки (рис. 3). Установлено, что максимальная ошибка измерения времени составляет ± 15 м сек.

Общая погрешность измерения среднего расхода

$$Q = \frac{V}{T}$$

определяется как сумма относительных ошибок измерения расхода и времени:

$$\delta Q = \delta V + \delta t = \delta V + \Delta t \frac{Q}{V},$$

т. е.

$$\delta Q = 0,03 + \frac{15 \cdot 10^{-3} \cdot Q \cdot 100}{1,7 \cdot 3600} = (0,03 + 2,5 \cdot 10^{-4} Q) \%.$$

Здесь Q расход в $м^3/ч$.

При максимальном расходе $300 м^3/ч$ ошибка составляет $0,1\%$.

Установка имеет также случайную погрешность, однако сумма систематической и случайной погрешностей не превышает полученной расчетной.

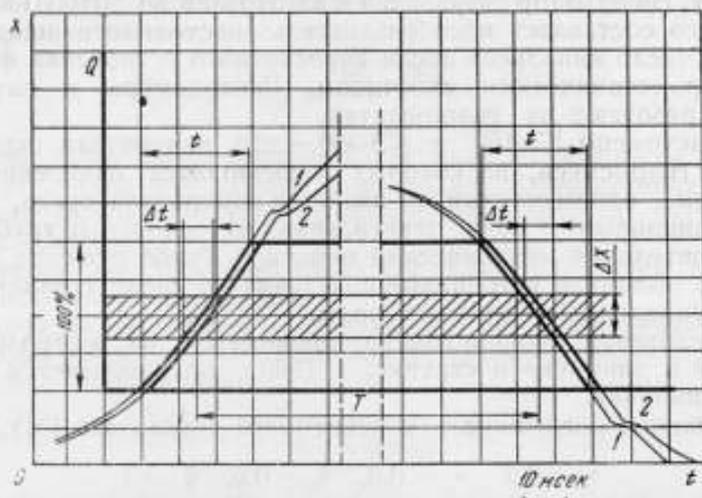


Рис. 3. Результаты скоростной киносъемки работы перекидного устройства.

T — фиксированное время заполнения мерника; t — время переброса потока; Δt — возможная ошибка времени из-за неточности установки выключателя; 1 — перебор без потока; 2 — перебор с потоком.

Наличие в установке весов и мерника дает возможность исследовать плотномеры в динамике.

Консистенция измеряется отбором твердого в сетчатую корзину при выпуске гидросмеси из мерника, поэтому погрешность консистенции определяется погрешностью измерения объема гидросмеси и твердого. Она тоже постоянна во всем диапазоне измерений и не превышает $0,1\%$ истинной консистенции.

В соответствии с принятыми направлениями во ВНИИГидроуголь разработаны и исследуются приборы, предназначенные для учета твердого при гидротранспорте. Это расходомеры ИРВ-150А и ИРВ-300, представляющие собой электромагнитные датчики герметичной конструкции [2, 3].

Исследование погрешностей расходомера ИРВ-150А на расходомерной установке показало, что параметры основной погрешности составляют (%):

$$\delta_0 = 0,3, \quad \sigma_0 = 0,07, \quad \delta_k = 0,5, \quad \sigma_k = 0,5.$$

Относительная погрешность прибора при работе на воде может быть выражена формулой

$$\delta_Q = 0,3 \frac{Q_m}{Q} + 0,5 + \sqrt{\left(0,2 \frac{Q_m}{Q}\right)^2 + 0,5^2}$$

или

$$\delta_Q = \left(0,5 \frac{Q_m}{Q} + 1\right) \%$$

На основе исследований, проведенных на гидросмесях, можно утверждать, что при вертикальной установке прибора его погрешность укладывается в указанную нормируемую. При использовании прибора отдельно от комплекса он может быть укомплектован счетчиком-интегратором, имеющим стандартный входной сигнал постоянного тока. Интегратор разработан и изготовлен во ВНИИГидроуголь. Основу его составляет преобразователь постоянного напряжения в частоту. Число импульсов после пересчетного устройства фиксируется электромеханическим счетчиком. Расходомеры и интеграторы успешно работают на гидрошахтах.

Консистомеры КЭ-150 и КЭ-300 — это измерители электропроводности гидросмеси, на которых производится измерение по мостовой схеме, одним плечом их является измеряемая среда, а вторым (компенсационным) — вода, ответвляемая от основного трубопровода с предварительной механической очисткой. Такое решение дало возможность получить устойчивые показания на среде с изменяющейся электропроводностью несущей воды.

Исследования консистомера проводятся на метрологической установке в динамике и статике, в 1969 г. предполагается провести его госиспытания.

Ожидаемая погрешность консистомера составляет (%):

$$\sigma_0 = 0,2, \quad \sigma_x = 0,3, \quad \delta_0 = 0,5, \quad \delta_x = 1.$$

Используя консистомер как самостоятельный прибор, его погрешность можно выразить формулой

$$\delta_{\varphi} = 0,5 \frac{\varphi_m}{\varphi} + 1 + \sqrt{\left(0,6 \frac{\varphi_m}{\varphi}\right)^2 + 0,9^2} \quad \text{или} \quad \delta_{\varphi} = 1,0 \frac{\varphi_m}{\varphi} + 1,5.$$

В качестве плотномера нами использован прибор ПЖР-5, исследования которого на углеобогатительной фабрике, а также на метрологической установке показали, что погрешность его при работе на гидросмеси значительно превышает рекламируемую. Большие трудности представляет тарировка прибора. Разработанные способы тарировки, а также изменения, внесенные в конструкцию прибора, позволят повысить его точность. Однако ожидаемая погрешность остается высокой (%):

$$\sigma_0 = 0,2, \quad \sigma_x = 0,1, \quad \delta_0 = 1, \quad \delta_x = 1,5.$$

Общая нормируемая погрешность плотномера составляет:

$$\delta_{(\rho - \rho_0)} = 1 \frac{\rho_m - \rho_0}{\rho - \rho_0} + 1,5 + \sqrt{\left(0,6 \frac{\rho_m - \rho_0}{\rho - \rho_0}\right)^2 + 0,1^2}$$

или

$$\delta_{(\rho - \rho_0)} = 1,6 \frac{\rho_m - \rho_0}{\rho - \rho_0} + 1,5.$$

На основе имеющихся данных по погрешностям отдельных приборов, составляющих комплекс, могут быть получены погрешности измерения количества твердого. Исходными для анализа являются формулы (1) и (2).

Суммирование систематических и случайных погрешностей отдельных приборов производится на основе известных формул.

Общая максимальная систематическая погрешность величины, представленной формулой $x = A(B + C)$, выражается как

$$\delta_x = \delta_A + \frac{\delta_B \cdot B + \delta_C \cdot C}{B + C}.$$

Общая случайная погрешность этой величины характеризуется среднеквадратической относительной погрешностью:

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_A^2 + \frac{(\sigma_B \cdot B)^2 + (\sigma_C \cdot C)^2}{(B + C)^2}}.$$

Рассчитанная таким образом предельная погрешность комплекса составляет 3 ÷ 5% при работе на расходах, превышающих 50% предела шкалы расходомера, и консистенциях порядка 50% предела шкалы консистомера.

Проверка метода учета твердого, т. е. комплекса приборов в целом, значительно затруднена.

Следовательно, особое значение получает внедрение методики определения погрешности комплекса по погрешности отдельных приборов, его составляющих.

Выводы

1. Наличие в напорных гидротранспортных системах воздуха, а также колебание плотности твердого не дают возможности создать систему учета твердого на базе двух приборов (расходомера и плотномера или расходомера и консистомера).

2. Создание метрологической расходомерной установки, работающей на гидросмесях, позволит исследовать погрешности расходомеров, консистомеров, плотномеров в динамике.

3. Для определения погрешностей измерения расхода твердого в гидросмеси необходимо разделение погрешностей на систематические и случайные, а также установление их зависимости от измеряемой величины.

4. Разработанные во ВНИИГидроуголь приборы — расходомер и консистомер — а также работы по повышению точности радиоактивного плотномера и создание системы из этих приборов дают возможность учитывать количество твердого при напорном гидротранспорте с погрешностью порядка 3%.

5. Предлагаемый метод учета твердого является перспективным. Дальнейшее его совершенствование может значительно снизить погрешности ориентировочно до 1–2%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпов М. Н. Сравнение потенциальных возможностей гравитационных и электрических измерителей консистенции угольных пульп, движущихся в трубопроводах. Труды «ВНИИГидроуголь», вып. XII, 1968.
2. Зарецкий Л. И., Гартман А. К., Белозеров И. Д. Приборы давления и расхода для гидрошахт. Труды «ВНИИГидроуголь», вып. XI, 1967.
3. Зарецкий Л. И. Возможности определения добычи гидрошахт с помощью приборов. Труды «ВНИИГидроуголь», вып. XI, 1967.

СОСТОЯНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ, ГАЗОВОЙ, НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ И НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Современный уровень развития народного хозяйства требует обеспечения промышленности большим объемом всевозможных точных измерений, что невозможно без наличия высокоточной измерительной техники.

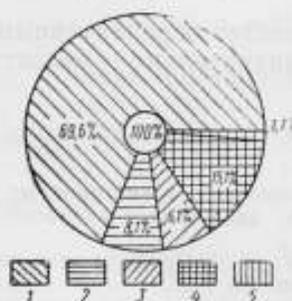
Развитию и совершенствованию измерительной техники придается огромное значение во всем мире.

Например, в химической промышленности Англии затраты на измерительные приборы составляют 15%, а в ФРГ — более 20% общих затрат на все производственное оборудование. В США на средства измерения только в нефтяной промышленности ежегодно расходуется около 26 млн. долларов. В последнее время требования к точности измерений стали сопоставимыми с требованиями к точности эталонов. Поэтому расходы на разработку эталонов составляют около 30% общих затрат крупнейших научно-исследовательских учреждений США, ФРГ и Англии.

Для выявления первостепенных задач по улучшению и совершенствованию измерительной техники метрологические институты Комитета стандартов, мер и измерительных приборов проводят большую работу по анализу состояния измерений в различных отраслях промышленности.

В статье приводятся результаты изучения и анализа состояния измерительной техники на предприятиях, наиболее оснащенных контрольно-измерительными приборами, с большим объемом и широкой номенклатурой выпускаемой продукции. Обследовано по два типовых предприятия нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей, нефтехимической и по одному предприятию газовой отраслей промышленности ТАССР, БАССР, Куйбышевской области.

На обследованных предприятиях основными видами измерений, определяющими и характеризующими состояние технологического процесса и уровень измерительной техники, являются следующие: температура, давления, расхода, уровня и физико-хи-



Количественное соотношение применяемых контрольно-измерительных приборов по видам измерений:

1 — давление, 2 — расход, 3 — уровень, 4 — температура, 5 — физико-химические измерения.

мические. Количественное соотношение применяемых контрольно-измерительных приборов по видам измерений приведено на диаграмме рисунка.

Как видим, 69,6% приходится на приборы для измерения давления и 15,1% — на приборы для измерения температуры. Приборы расхода, уровня и физико-химических измерений составляют всего 15%.

Оснащенность предприятий контрольно-измерительными приборами (КИП) характеризуется соотношением затрат на них и общих затрат на технологическое оборудование и контрольно-измерительные приборы:

$$K_{\text{осн}} = \frac{Q_n}{Q_n + Q_t} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где Q_n — капитальное вложение на КИП,

Q_t — капитальное вложение на технологическое оборудование.

Наибольшая оснащенность (7%) приходится на нефтедобывающую промышленность, а на предприятия нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности — всего 5,5%, что объясняется более высокой стоимостью технологического оборудования. Относительно низкую оснащенность КИП в газовой промышленности можно объяснить отсутствием сложных и дорогих приборов-анализаторов и вследствие этого сравнительно высокой стоимостью технологического оборудования.

В нефтедобывающей промышленности, например, отсутствуют удовлетворяющие современным требованиям расходомеры для учета добываемой нефти и расхода реагента, солемеры и влагомеры нефти, анализаторы сернистых соединений в бензине и т. д. В газовой промышленности нет влагомеров газа, расходомеров для сжиженных газов, газоанализаторов и других необходимых приборов.

За рубежом же широко применяются индукционные и ультразвуковые расходомеры, тахометрические счетчики, трубопоршневые установки, солемеры, влагомеры, хроматографы и другие приборы физико-химических измерений, установленные непосредственно на технологических потоках.

В удовлетворительном состоянии в обследованных отраслях промышленности находится метрологическое обслуживание приборов для измерения давления и температуры, но недостаточно приборов для измерения расхода, уровня и физико-химических измерений, т. е. измерений параметров, определяющих количество и качество выпускаемой продукции.

Так, для приборов измерения расхода существуют методы и методические разработки по поверке лишь приборов, работающих на принципе переменного перепада давлений. При этом поверяются только дифманометры, а не сам измеритель, т. е. диафрагма. Полностью отсутствуют поверочные средства для приборов физико-химических измерений.

Рассмотрим состояние и уровень измерения расхода по отраслям промышленности.

В нефтедобывающей промышленности основными расходомерами, применяющимися в настоящее время для измерения расхода нефти и газа в технологических процессах добычи и подготовки нефти, являются расходомеры-дифманометры поплавковые типа ДП класса точности 1,5, позволяющие измерять практически любые большие

расходы жидкости, газа. Они составляют около 50% общего количества приборов, применяемых на предприятиях для измерения расходов и количеств нефти. При измерениях расходов сырой нефти, представляющей собой двухфазную трехкомпонентную смесь (нефть, вода, газ), расходомеры-дифманометры дают большие погрешности. Кроме того, имеющиеся в сырой нефти твердые частицы и парафин быстро меняют параметры сужающих устройств, т. е. происходит закругление входной кромки отверстия, которое может привести к увеличению погрешности до 2—3%. Двухфазность измеряемой среды уменьшает точность показаний приборов, рассчитанных на измерение расходов однофазных сред. Все это приводит к значительному изменению значения коэффициента расхода, что влечет появление дополнительных погрешностей, иногда превышающих класс точности прибора в несколько раз.

Для измерения дебита скважин на групповых установках применяются объемные дебитометры типов ДПН-3, ДПН-5, ДПН-7 класса точности 2,5, которые составляют 21% общего количества приборов для измерения расходов и количеств нефти. Наличие растворенного попутного газа в сырой нефти, вспенивание сырой нефти в дебитометре, оседание парафина на его стенках, особенно интенсивно происходящее при низких температурах в холодное время года, приводят к увеличению погрешности измерения, превышающей в 2—3 и более раз паспортную погрешность прибора.

Анализ показал, что погрешность приборов иногда достигает $\pm 10 + 15\%$, тогда как паспортная составляет $\pm 2,5\%$. В силу этого дебитометры нельзя применять для учетных операций, их можно рекомендовать в качестве индикаторов для наблюдения за изменением режима работы скважин.

В цехах комплексной подготовки нефти используются ротаметры типов РС, РЭД, РГД классов точности 1,5+4, но они не прошли государственные испытания. Шкалы приборов не отградуированы в единицах расхода измеряемой среды, поэтому приборы могут быть рекомендованы лишь как индикаторы.

Для исследований нефтяных скважин применяются глубинные расходомеры типа РГД с погрешностью $\pm 2,5\%$ в диапазоне $5 + 2000 \text{ м}^3/\text{сутки}$ и $\pm 5\%$ в диапазоне $200 + 2000 \text{ м}^3/\text{сутки}$. Обследование показало, что точность используемых в настоящее время глубинных расходомеров не обеспечивает проведения исследований на необходимом уровне.

Для измерения уровня взлива нефти на нефтепромыслах имеются уровнемеры типов УДУ с погрешностью показаний $\pm 6 \text{ мм}$ и другие, но они не пригодны для контроля и оперативного учета товарной нефти, так как не обеспечивают необходимой точности измерений. Поэтому учет нефти в товарных парках осуществляется измерениями уровня устаревшими способами — при помощи мерной рулетки с лотом или метроштоками и последующим расчетом объема нефти.

В газовой, нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслях промышленности для измерения расходов жидкостей и газов применяются также расходомеры, работающие на принципе постоянного и переменного перепада давлений классов точности 1,5+4; в сравнительно небольших количествах используются счетчики типа МПС, ВВ классов точности 2+3. Следовательно, возникает необходимость создания точных расходомеров для измерений расходов нефти, ряда нефтепродуктов, сжиженных и агрессивных (сероводород и др.) газов, вязких сред (гудрон, смолы, битум) и целого ряда других продуктов.

Таким образом, состояние и уровень техники измерений расходов и количеств жидкостей и газов не отвечают современным требованиям производства. На предприятиях применяются в основном расходомеры переменного перепада давлений (76% общего количества расходомеров). Погрешность приборов велика и составляет, как правило, 1,5 ÷ 2,5%. Более того, анализ работы приборов показал, что действительная погрешность применяемых приборов во многих случаях значительно превышает паспортную. Отсутствуют расходомеры и счетчики жидких и газообразных сред, например, двухфазной трехкомпонентной смеси, сжиженных и агрессивных газов, мазутов, а также целого ряда нефтепродуктов.

Такое положение сложилось в результате того, что приборостроительная промышленность не разрабатывает или медленно осваивает приборы, основанные на таких методах измерений, как, например, тахометрические, индукционные, ультразвуковые, массовые и т. д., получивших в последнее время за границей широкое распространение благодаря высокой точности измерений, стабильности показаний, хороших гидродинамических характеристик и независимости от физико-химических свойств измеряемой среды.

Одной из основных причин, препятствующих созданию приборов новых типов, является отсутствие в стране необходимой метрологической базы в области измерений расходов и количеств жидкостей и газов. Имеющиеся немногочисленные испытательные расходомерные установки не обеспечивают проведения исследовательских работ в области расходомерии, а зачастую — даже проведения аттестации и государственных испытаний новых типов расходомеров.

В процессе эксплуатации и после ремонта из-за отсутствия методик и поверочных средств не поверяются приборы уровня, физико-химических измерений, расхода и количества жидкостей и газов, например, расходомеры постоянного перепада давлений (ротаметры) типов РС, РЭД, РПД, расходомеры-дебиторы типа ДПН, глубинные расходомеры типа РГД, счетчики типов СВШ, ВВ и др., следовательно, точность показаний этих приборов не гарантируется.

В таблице дана точностная потребность в расходомерных поверочных средствах поверяемых приборов предприятий нефтедобывающей, газовой, нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслей

Наименование и тип	Класс точности	Пределы измерения	Применяемые поверочные средства	Класс точности необходимых поверочных средств
Ротаметры стеклянные типа РС	1,5	10—100 л/ч	Отсутствуют	0,5
Ротаметры электрические дистанционные типа РЭД	2,5	50—250 л/ч	То же	0,5
Ротаметры пневматические дистанционные типа РПД	2,5	50—250 л/ч	•	0,5
Расходомеры-дифманометры ДП, ДПП, ДППМ, 64-ДП, ДПЭМ, ДК, ДМ, ДС и ДСС	1÷1,5	0—40, 63, 100, 160, 250, 630, 1000 м³/ч	Прибор Петрова ППР-1, 2	0,3
Сужающие устройства (диафрагмы)	—	0—40, 63, 100, 160, 250, 630, 1000 м³/ч	Отсутствуют	0,1
Счетчики типов СВШ, ВВ и др.	0,5÷3	6—80 м³/ч 6—60 м³/ч	То же	0,1÷0,5
Расходомеры глубинные дистанционные типа РГД	2,5÷5	200—2000 м³/сутки	•	0,5÷1,0
Дебитометры нефтяные промысловые типа ДПН	2,5	150 м³/сутки	•	0,5

промышленности. Как видим, из применяемых расходомеров в процессе эксплуатации поверяются только дифманометры-расходомеры переменного перепада давлений типов ДП, ДМ и др. прибором Петрова ППР-1,2 согласно правилам 28—64. Поверка сужающих устройств заключается в проверке расчета, измерении диаметра диафрагмы, визуальной проверке остроты входной кромки и чистоты поверхности. Поверка сужающих устройств проливным методом не производится.

Таким образом, для удовлетворения нужд промышленности первоочередными задачами в области расходомерии являются: создание более точных, чувствительных и надежных приборов для широкой номенклатуры жидкостей и газов и оснащение ими промышленных предприятий; создание поверочных средств и оснащение ими служб государственного и ведомственного надзора.

Успешное решение указанных задач возможно лишь при создании в стране метрологического центра в области измерений расходов и количеств жидкостей и газов как основы для проведения научно-исследовательских и экспериментальных работ.

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА И ПЕРЕСЧЕТА СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБИННОГО РАСХОДОМЕРА

Достоинства турбинных расходомеров (большая точность измерения в широких пределах, малое гидравлическое сопротивление, малая инерционность, простота, надежность и большой срок службы) общепризнаны. Тем не менее в народном хозяйстве нашей страны они не получили широкого распространения. Одной из причин этого является необходимость индивидуальной тарировки расходомера на измеряемой жидкости. Такая тарировка требует либо применения специальных дорогостоящих установок, либо вообще не всегда возможна. Поэтому избежать тарировок на рабочей жидкости, подобно тому, как это достигнуто для расходомерных диафрагм и сопел, — насущная задача, для решения которой необходимо знать зависимость гидродинамических характеристик расходомера от физических параметров измеряемой среды.

Попытки обобщения опытных данных и теоретических разработок по данному вопросу в нашей стране и за границей пока не привели к удовлетворительным результатам. Существующие методы расчета и пересчета статической характеристики расходомера принципиально не согласуются с экспериментальными данными. В некоторых случаях, например, в противоположность расчетам, угловая скорость вертушки расходомера с ростом вязкости жидкости не уменьшается, а возрастает.

Проведенный в НИИ Теплоприбор анализ показал, что в принципе возможно при пересчете тарировочной кривой достигнуть точности порядка 0,5%. При этом точность расчета сил сопротивления порядка 15% оказывается достаточной, так как отличие действительной угловой скорости вертушки ω от угловой скорости при отсутствии сил сопротивления ω_0 обычно невелико. Поэтому, если, например, разность $\omega_0 - \omega$ составляет 3% от ω , то при точности расчета сил сопротивления, равной 15%, погрешность расчета действительной угловой скорости составит всего 0,45%.

Уравнение статической характеристики расходомера с винтовой вертушкой при осевом подводе жидкости можно представить в виде:

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{\omega_p}{\omega_0} - \frac{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2}{1 + \left(\frac{d}{D}\right)^2} \cdot \frac{\Sigma M_{\Sigma} T}{\rho Q^2}, \quad (1)$$

где ω_p — разгонная угловая скорость вертушки, т. е. угловая скорость при отсутствии внешних сил сопротивления;

D — наружный диаметр вертушки;

d — диаметр втулки вертушки;

T — шаг винтовых поверхностей, образующих лопасти вертушки;

ΣM_n — суммарный момент внешних сил, действующих на вертушку;

ρ — плотность жидкости;

Q — объемный расход.

Величина разгонной угловой скорости определяется действием сил гидравлического трения, т. е. зависит от числа Рейнольдса. При определении ω_p должны быть учтены в принципе силы гидравлического трения, действующие по всем поверхностям вертушки. Однако определяющее влияние на метрологические свойства расходомера оказывают силы трения, действующие по винтовым поверхностям лопастей. Эти силы поддаются систематическому расчету, причем хорошей моделью действительного течения в межлопастных каналах служит плоская решетка пластин.

Величина и характер сил трения, действующих по другим поверхностям вертушки (дисковое трение, трение по цилиндрической поверхности втулки и т. д.), зависят от многих конструктивных особенностей, которые трудно систематизировать. Например, силы дискового трения зависят от втулочного отношения $\frac{d}{D}$, величины зазора между торцом втулки турбины и корпусом, конструкции опор, уплотнений и т. п. Поэтому целесообразно эти силы выделить, и их момент представить в виде

$$M_{r. c.} = \frac{1}{zA} C_m \rho Q^2, \quad (2)$$

где A — коэффициент, имеющий размерность длины;

C_m — безразмерный коэффициент, зависящий от числа Рейнольдса.

С учетом (2) уравнение (1) принимает вид

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{\omega_{pp.}}{\omega_0} - \frac{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2}{1 + \left(\frac{d}{D}\right)^2} \cdot \frac{T}{A} C_m - \frac{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2}{1 + \left(\frac{d}{D}\right)^2} \frac{\Sigma M_n T}{\rho Q^2}, \quad (3)$$

где $\omega_{pp.}$ — разгонная угловая скорость решетки.

Методы расчета сил, учитываемых вторым членом в правой части уравнения (3), в ряде случаев хорошо разработаны. Иногда пренебрегают всеми силами, кроме дискового трения, при расчете которого применяют формулу для момента трения на вращающемся диске, смачиваемом с обеих сторон [1].

В этом случае уравнение (3) принимает вид

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{\omega_{pp.}}{\omega_0} - \frac{D}{T} \frac{\left(\frac{d}{D}\right)^5}{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4} C_{m. d} - \frac{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2}{1 + \left(\frac{d}{D}\right)^2} \frac{\Sigma M_n T}{\rho Q^2}, \quad (4)$$

где $C_{m. d}$ — безразмерный коэффициент дискового трения, зависящий от числа Рейнольдса.

Отношение $\frac{\omega_{p.p.}}{\omega_0}$ определяется по формуле [2]

$$\frac{\omega_{p.p.}}{\omega_0} = \frac{t \sin \beta}{t \sin \beta - 2\delta_2^*} \left(1 - \frac{2\theta_2}{t \sin \beta - 2\delta_2^*} \right). \quad (5)$$

Здесь все величины в правой части соответствуют их значению на эффективном диаметре вертушки $D_{эф} = \sqrt{\frac{D^2 + d^2}{2}}$, при этом предполагается, что пограничные слои на лопастях в разгонном режиме немного отличаются от пограничного слоя на плоской пластине, обтекаемой в продольном направлении,

$t = \frac{\pi D_{эф}}{z}$ — шаг решетки;

z — число лопастей вертушки;

β — угол установки пластин в решетке;

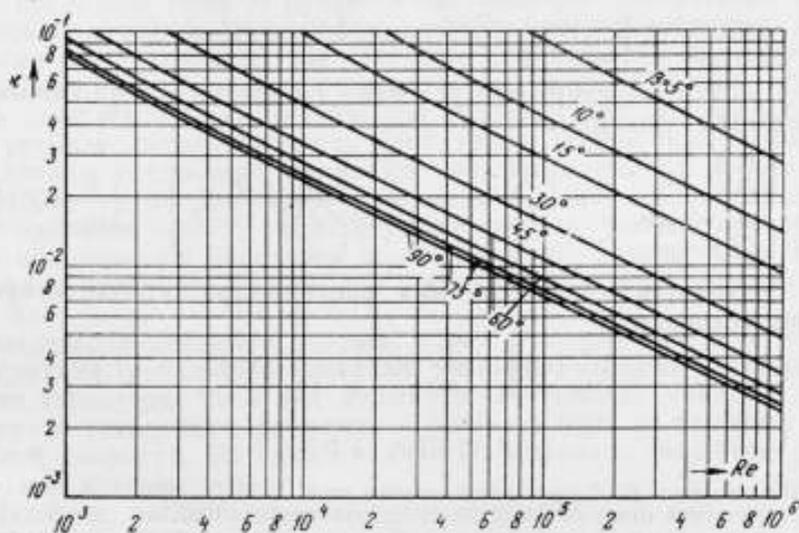
δ_2^* — толщина вытеснения на выходной кромке лопасти;

θ_2 — толщина потери импульса на выходной кромке лопасти.

Методы расчета характеристик пограничного слоя δ^* и θ изложены, например, в работах [3, 4].

Из формулы (5) следует, что, если

$$\theta_2 < \delta_2^* - \frac{2(\delta_2^*)^2}{t \sin \beta}, \text{ то } \frac{\omega_{p.p.}}{\omega_0} > 1.$$



Зависимость коэффициента z от числа Рейнольдса на выходной кромке пластины.

Для решетки пластин в разгонном режиме это условие соблюдается при любом режиме движения жидкости в пограничном слое.

На рисунке показана зависимость величины $z = \frac{\omega_{p.p.}}{\omega_0} - 1$ от числа Рейнольдса на выходной кромке пластины и угла β при густоте решетки $\frac{l}{t} = 1, 2$ (l — длина пластины в решетке) и ламинар-

ном пограничном слое на лопасти. Эта зависимость и объясняет экспериментальный факт роста угловой скорости вертушки с увеличением вязкости измеряемой жидкости.

Введение зависимости (5) в уравнение статической характеристики позволяет согласовать (хотя бы качественно) теорию с экспериментом. При разработках турбинных расходомеров во ВНИИТеплоприбор это дало возможность приближенно предсказывать их метрологические свойства.

Для более точных расчетов (в том числе и для создания обоснованного метода пересчета характеристик) необходима корректировка изложенных зависимостей на основе эксперимента. При этом существенное облегчение задачи дала бы стандартизация турбинных расходомеров.

Предварительно можно предложить следующий порядок пересчета характеристики расходомера, полученной на воде (или другой подходящей жидкости) на среду с другой вязкостью и плотностью.

1. Расчетным путем определяется зависимость:

$$\frac{\omega_{p,p}}{\omega_0} = \frac{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2}{1 + \left(\frac{d}{D}\right)^2} \frac{T}{A} C_m = f(Re).$$

2. Тарировкой на подходящей жидкости (во время тарировки плотность и вязкость жидкости должны поддерживаться постоянными) определяются характеристики расходомера:

$$\left[\frac{\omega}{\omega_0}(Q) \right]_T, \left[\frac{\omega}{\omega_0}(Re) \right]_T, \left[\frac{\omega}{\omega_0}(\rho Q^2) \right]_T.$$

3. При соответствующих условиям тарировки числа Рейнольдса определяется зависимость:

$$\left[\frac{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2}{1 + \left(\frac{d}{D}\right)^2} \frac{\Sigma M_n T}{\rho Q^2} \right]_T = \left[\frac{\omega_{p,p}}{\omega_0} \right]_T - \left[\frac{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2}{1 + \left(\frac{d}{D}\right)^2} \frac{T}{A} C_m \right]_T - \left[\frac{\omega}{\omega_0}(\rho Q^2) \right]_T.$$

4. Находятся характеристики расходомера, соответствующие рабочим условиям:

$$\left[\frac{\omega}{\omega_0}(Q) \right]_p, \left[\frac{\omega}{\omega_0}(Re) \right]_p, \left[\frac{\omega}{\omega_0}(Re) \right]_p.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., ИЛ, 1956.
2. Технический отчет № 08033226. НИИТеплоприбор, 1967.
3. Schlichting H. und Scholz N. Über die theoretische Berechnung der Strömungsverluste eines ebenen Schaufelgitters. Ing. Archiv, 19, 1951.
4. Scholz N. Ein einfaches Singularitätenverfahren zur Erzeugung von Schaufelgitter. ZAMM, Bd. 30, Heft 8/9, 1950.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ГИДРОДИНАМИКИ ТРУБОПОРШНЕВЫХ
РАСХОДОМЕРНЫХ УСТАНОВОК

Развитие науки и техники предопределяет широкое использование самых различных средств измерений, из которых измерения расходов и количеств веществ начинают играть все большую роль.

Приборостроительная промышленность выпускает множество различных приборов для измерения расходов и количеств веществ, но точность измерений сейчас уже не удовлетворяет запросов промышленного производства. Это, в свою очередь, вызывает необходимость в уменьшении погрешностей образцовых поверочных установок [1—4].

В последние годы за рубежом получили распространение трубопоршневые поверочные установки, обладающие известными достоинствами (портативность, мобильность, возможность параллельного включения с поверяемым прибором и пр.) и позволяющие осуществить комплексную автоматизацию операции поверки прибора.

Учитывая перспективность проведения поверочных работ по определению точностных характеристик расходомеров и счетчиков с помощью трубопоршневых установок [5], при их разработке и проектировании особое внимание должно быть уделено теоретическому обоснованию поведения поршня при его движении в трубопоршневой установке (ТПУ), что будет определять размеры всей установки.

Анализируя движение поршня, можно условно выделить начальный, средний (рабочий) и конечный участки движения. Для каждого участка характерен свой вид движения. Начальный участок характеризуется ускорением движения поршня от нуля до какой-то определенной скорости. На рабочем участке поршень движется равномерно, и на конечном участке движение замедляется до полной его остановки.

Если рассматривать двунаправленную трубопоршневую установку, то начальный и конечный участки по длине должны быть равными и назначаются по наибольшему из них.

Рассмотрим следующие варианты положения трубы в пространстве:

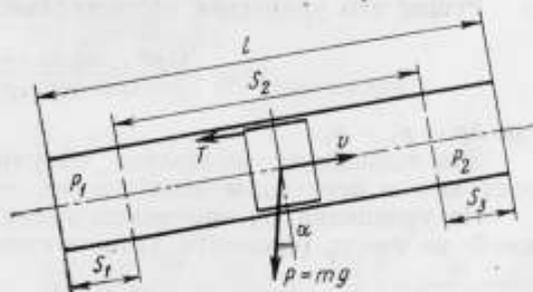


Рис. 1. Схема движения поршня.

- 1) общий случай (труба расположена под углом α к горизонту),
- 2) труба расположена горизонтально,
- 3) труба расположена вертикально.

Пусть участок трубы, по которому движется поршень (рис. 1) под действием напора рабочей жидкости, расположен под углом α к горизонту.

Угол α будем считать положительным, если поршень движется вверх, и отрицательным, если поршень движется вниз.

На основании принципа Даламбера можно записать уравнение движения поршня в общем случае:

$$m \frac{dv}{dt} = (p_1 - p_2) F - \frac{\lambda \cdot l \cdot \gamma \cdot F}{d \cdot 2g} v^2 - mg \sin \alpha - T, \quad (1)$$

где m — масса поршня;

v — скорость движения поршня;

g — гравитационная постоянная;

l — длина рассматриваемого участка трубы (за вычетом длины поршня);

F — площадь сечения трубопровода;

γ — удельный вес;

λ — безразмерный коэффициент трения;

T — сила трения;

T_1 — сила трения, обусловленная упругостью уплотняющих манжет;

T_2 — сила трения, обусловленная весом поршня.

Как видим, движущей силой будет величина Δp , равное разности давлений с обеих сторон поршня, умноженной на площадь сечения поршня. Эта движущая сила для равномерного потока на участке l не меняется [1]. Силами сопротивления при движении поршня вместе с потоком жидкости будут гидравлические сопротивления по длине трубопровода, инерция поршня, силы трения. До достижения постоянной скорости на первоначальном участке S_1 поршень будет двигаться с ускорением и, набрав скорость v , на участке S_2 поршень будет двигаться равномерно.

Из условия равномерности движения поршня на участке S_2 следует, что $\frac{dv}{dt} = 0$.

Тогда уравнение движения поршня на участке S_2 примет вид

$$(p_1 - p_2) F - \frac{\lambda \cdot \gamma \cdot F}{d \cdot 2g} v^2 - mg \cdot \sin \alpha - T = 0. \quad (2)$$

Решая это уравнение относительно v , получим

$$v^2 = \frac{(\Delta p F - mg \sin \alpha - T) d \cdot 2g}{\lambda \cdot \gamma \cdot F}, \quad (3)$$

где $\Delta p = p_1 - p_2$.

Это выражение позволяет получить зависимость между скоростью v и перепадом давления Δp .

Из уравнения (1) определим время разгона поршня от скорости $v = 0$ до $v = v_p$ (скорость установившегося движения):

$$m \frac{dv}{dt} = \Delta p F - \frac{\lambda \gamma F}{d 2g} v^2 - mg \sin \alpha - T.$$

Разделим левую и правую части уравнения на m и обозначим:

$$A = \frac{\Delta p F - mg \sin \alpha - T}{m},$$

$$B = \frac{\lambda l_1 F}{d 2 g m}.$$

Тогда

$$\frac{dv}{dt} = A - Bv^2, \quad \frac{dv}{A - Bv^2} = dt.$$

Интегрируем это выражение:

$$\int_0^v \frac{dv}{A - Bv^2} = \int_0^t dt = t.$$

$$\int_0^v \frac{dv}{A - Bv^2} = \frac{1}{B} \int_0^v \frac{dv}{\frac{A}{B} - v^2} = \frac{1}{B \cdot 2 \sqrt{\frac{A}{B}}} \ln \frac{\sqrt{\frac{A}{B}} + v}{\sqrt{\frac{A}{B}} - v} =$$

$$= \frac{1}{2 \sqrt{AB}} \ln \frac{\sqrt{\frac{A}{B}} + v}{\sqrt{\frac{A}{B}} - v}.$$

Окончательно запишем выражение для времени разгона поршня:

$$t = \frac{1}{2 \sqrt{AB}} \ln \frac{\sqrt{\frac{A}{B}} + v}{\sqrt{\frac{A}{B}} - v}. \quad (4)$$

Определим закон изменения скорости на начальном участке.
Из уравнения (4) имеем:

$$2t \sqrt{AB} = \ln \frac{\sqrt{\frac{A}{B}} + v}{\sqrt{\frac{A}{B}} - v}, \quad \frac{\sqrt{\frac{A}{B}} + v}{\sqrt{\frac{A}{B}} - v} = e^{2t \sqrt{AB}},$$

$$\sqrt{\frac{A}{B}} + v = \left(\sqrt{\frac{A}{B}} - v \right) e^{2t \sqrt{AB}},$$

$$v(1 + e^{2t \sqrt{AB}}) = \sqrt{\frac{A}{B}} (e^{2t \sqrt{AB}} - 1),$$

$$v = \sqrt{\frac{A}{B}} \left(\frac{e^{2t \sqrt{AB}} - 1}{e^{2t \sqrt{AB}} + 1} \right). \quad (5)$$

Длина начального участка S_1 определяется из выражения

$$\frac{dS_1}{dt} = \frac{\sqrt{\frac{A}{B}} (e^{2t \sqrt{AB}} - 1)}{e^{2t \sqrt{AB}} + 1};$$

$$S_1 = \sqrt{\frac{A}{B}} \int_0^t \frac{e^{2t \sqrt{AB}} - 1}{e^{2t \sqrt{AB}} + 1} dt = \sqrt{\frac{A}{B}} \int_0^t \frac{e^{2t \sqrt{AB}}}{e^{2t \sqrt{AB}} + 1} dt - \sqrt{\frac{A}{B}} \int_0^t \frac{dt}{e^{2t \sqrt{AB}} + 1} =$$

$$\begin{aligned}
&= \sqrt{\frac{A}{B}} \frac{1}{2\sqrt{AB}} \left[\ln(1 + e^{2t\sqrt{AB}}) \Big|_0^t - \ln \frac{e^{2t\sqrt{AB}}}{1 + e^{2t\sqrt{AB}}} \Big|_0^t \right] = \\
&= \sqrt{\frac{A}{B}} \frac{1}{2\sqrt{AB}} \ln \frac{(1 + e^{2t\sqrt{AB}})^2}{e^{2t\sqrt{AB}}} \Big|_0^t = \frac{1}{2B} \left[\ln \frac{(1 + e^{2t\sqrt{AB}})^2}{e^{2t\sqrt{AB}}} - \ln 4 \right] = \\
&= \frac{1}{2B} \ln \frac{(e^{2t\sqrt{AB}} + 1)^2}{4e^{2t\sqrt{AB}}}. \quad (6)
\end{aligned}$$

Для конечного участка S_3 имеем: $\Delta p = 0$, и скорость падает от v_p до $v = 0$, из уравнения (1) получим:

$$m \frac{dv}{dt} = - \frac{\lambda \gamma F}{d 2g} v^2 - mg \sin \alpha - T.$$

Разделим обе части данного выражения на m и обозначим:

$$A_1 = g \sin \alpha + \frac{T}{m} \quad \text{и} \quad B_1 = \frac{\lambda \gamma F}{d 2gm}.$$

Тогда время замедления скорости поршня определяется:

$$\begin{aligned}
\frac{dv}{dt} &= - B_1 v^2 - A_1, \quad - \frac{dv}{B_1 v^2 + A_1} = dt. \\
t &= - \int_v^0 \frac{dv}{B_1 v^2 + A_1} = \int_0^v \frac{dv}{B_1 v^2 + A_1} = \frac{1}{B_1} \int_0^v \frac{dv}{v^2 + \frac{A_1}{B_1}} = \\
&= \frac{1}{B_1 \sqrt{\frac{A_1}{B_1}}} \operatorname{arctg} \frac{v}{\sqrt{\frac{A_1}{B_1}}} = \frac{1}{\sqrt{A_1 B_1}} \operatorname{arctg} \frac{v}{\sqrt{\frac{A_1}{B_1}}}. \quad (7)
\end{aligned}$$

Преобразуем это выражение:

$$t \sqrt{A_1 B_1} = \operatorname{arctg} \frac{v}{\sqrt{\frac{A_1}{B_1}}}$$

или

$$\frac{v_k}{\sqrt{\frac{A_1}{B_1}}} = \operatorname{tg} t \cdot \sqrt{A_1 B_1}.$$

Отсюда скорость замедления определится формулой:

$$v_k = \sqrt{\frac{A_1}{B_1}} \cdot \operatorname{tg} t_3 \cdot \sqrt{A_1 B_1}. \quad (8)$$

Это уравнение отражает закон изменения скорости поршня на конечном участке.

Из общего случая движения поршня рассмотрим частный случай $\alpha = 0$ (труба расположена горизонтально), при этом $\sin \alpha = 0$, тогда уравнение движения поршня принимает вид:

$$m \frac{dv}{dt} = \Delta p \cdot F - \frac{\lambda \cdot l \cdot \gamma \cdot F}{d \cdot 2g} v^2 - T,$$

где $T = T_1 + T_2$.

Скорость движения поршня на среднем участке в установившемся режиме определится из (3):

$$v^2 = \frac{(\Delta p \cdot F - T) d \cdot 2g}{\lambda \cdot l \cdot \gamma \cdot F} \quad (9)$$

Время разгона получим из (4):

$$t = \frac{1}{2\sqrt{AB}} \ln \frac{\sqrt{\frac{A}{B}} + v}{\sqrt{\frac{A}{B}} - v}$$

где

$$A = \frac{\Delta p F - T}{m} \quad \text{и} \quad B = \frac{\lambda l F}{d 2gm}$$

Длина начального участка

$$S_1 = \frac{1}{2B} \ln \frac{(e^{2t\sqrt{AB}} + 1)^2}{4e^{2t\sqrt{AB}}} \quad (10)$$

Закон изменения скорости на начальном участке

$$v = \sqrt{\frac{A}{B}} \frac{e^{2t\sqrt{AB}} - 1}{e^{2t\sqrt{AB}} + 1} \quad (11)$$

Для конечного участка S_2 имеем: $\Delta p = 0$, и скорость падает от v_p до $v = 0$.

Время замедления

$$t_2 = \frac{1}{\sqrt{A_1 B_1}} \operatorname{arctg} \frac{v}{\sqrt{\frac{A_1}{B_1}}} \quad (12)$$

Закон изменения скорости на конечном участке

$$v_k = \sqrt{\frac{A_1}{B_1}} \operatorname{tg} t_2 \sqrt{A_1 B_1} \quad (13)$$

На рис. 2а и б приведены графики изменения скорости движения поршня на начальном (а) и конечном (б) участках во времени для ТПУ со следующими данными: масса поршня 50 кг, диаметр

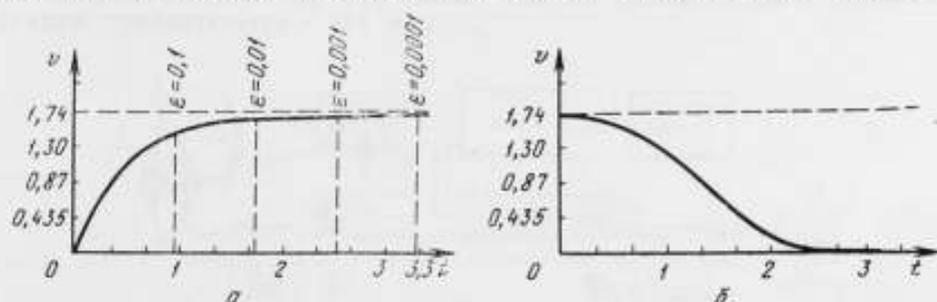


Рис. 2. Диаграмма скоростей на начальном и конечном участках трубы.

поршня 0,5 м, длина поршня 0,8 м, длина трубы ТПУ 18 м, рабочая жидкость — вода, манжеты поршня изготовлены из маслбензостойкой резины, перепад давления на поршне 0,01 кг/см².

Из графиков видно, что длина начального участка S_1 равна 2,23 м для случая достижения скорости установившегося режима

с погрешностью $\varepsilon = 0,01\%$; длина конечного участка S_3 составляет 2,08 м.

Таким образом, получено нелинейное дифференциальное уравнение, описывающее характер движения поршневого разделителя на трех участках ТПУ — начальном, среднем и конечном. Для всех участков определены законы изменения скорости и время переходного процесса при переходе разделителя с одного участка на другой. Эти уравнения также позволяют определить длины участков разгона и замедления скорости разделителя и вместе с длиной калиброванной секции ТПУ (средний участок) определяют основные габаритные размеры трубопоршневой установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров Р. Л. Газодинамический расчет установки с легким поршнем. Труды Ленинградского политехнического института, 1965, № 248.
2. Кибель И. А. и др. Теоретическая гидрогазодинамика. Ч. II. М., ИТЛ, 1948.
3. Крагельский И. В., Виноградова И. Э. Коэффициенты трения. М., Машгиз, 1962.
4. Ходанович И. Е. Аналитические основы проектирования и эксплуатации магистральных газопроводов. М., Гостоптехиздат, 1961.
5. Устройство для калибровки расходомеров. Патент США, 1960, № 2948144.

ШАРОПОРШНЕВАЯ ГАЗОМЕРНАЯ УСТАНОВКА

Значительная сложность и высокая стоимость образцовых установок с мерниками [1], а также невозможность осуществления ими поверки приборов непосредственно на месте эксплуатации стимулировали поиски других типов поверочных газомерных установок. В настоящее время за рубежом для поверки счетчиков количества жидкостей [2, 4] широко применяются поршневые поверочные установки. Делаются также попытки решить поставленную задачу применительно к расходомерам и счетчикам газа. Например, создана поршневая газомерная установка, в которой, хотя и достигнуты значительные расходы (до $4250 \text{ м}^3/\text{ч}$ при давлении 56 кгс/см^2), перемещение поршня осуществляется при значительной (350 кгс/м^2) потере давления [3]. Кроме того, в установке трудно достижимы условия поверки при полностью установленном режиме работы поверяемого прибора.

Нами разработана и изготовлена шаропоршневая газомерная установка с неуплотненным легким поршнем, перемещение которого в калиброванной секции трубопровода осуществляется при весьма незначительной потере давления. Поршень из полиэтиленовой пленки наполнен смесью геля и воздуха в пропорции, обеспечивающей взвешенное состояние его в атмосфере измеряемого газа. Его диаметр выбирался из условий: с одной стороны — обеспечение минимального зазора со стенками трубы и с другой — технологическая возможность изготовления. Он составляет 142 мм (диаметр калиброванной секции трубопровода — 144 мм).

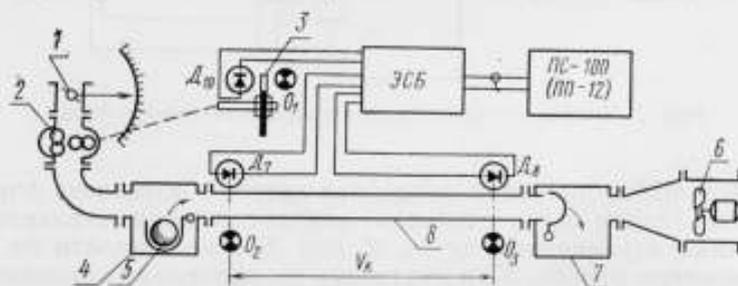


Рис. 1. Принципиальная схема шаропоршневой газомерной установки.

В установке (рис. 1) поток газа, отсасываемый осевым вентилятором 6, проходит через заслонку 1 для регулирования расхода, поверяемый прибор 2 и калиброванную секцию трубопровода 8.

Поверяемый прибор оборудован тахометрическим генератором импульсов, состоящим из обтюратора 3, фотодиода D_{10} и осветителя O_1 . Сигналы фотодиода D_{10} тахометрического генератора импульсов подаются в электронно-счетный блок (ЭСБ).

В установленном режиме работы в поток „на ходу“ с помощью устройства 4 вводится шаровой поршень 5. Он подхватывается потоком газа и транспортируется вдоль калиброванной секции трубы, где его положение последовательно отмечается фотодатчиками D_7 и D_8 . При пересечении светового пучка от осветителя O_2 электронно-счетный блок получает команду начала съема отсчета показаний поверяемого прибора „на ходу“.

С этого момента электромеханический счетчик импульсов электронно-счетного блока начинает счет импульсов тахогенератора. Для повышения надежности работы счет импульсов дублируется пересчетным устройством ПС-100 или ПП-12.

При пересечении поршнем светового луча осветителя O_3 съем отсчета прекращается, а поршень улавливается в устройстве 7 и выводится из потока. Сравнивая отсчитанные ЭСБ и пересчетным устройством ПС-100 или ПП-12 показания с контрольным объемом V_k калиброванной секции трубопровода 8, находят искомую погрешность поверяемого прибора. Для перевода поршня в устройство 4 меняют направление потока газа.

Электронно-счетный блок установки (рис. 2) состоит из блока питания, формирующего блока со схемой запуска и остановки, а также электромеханического счетчика импульсов.

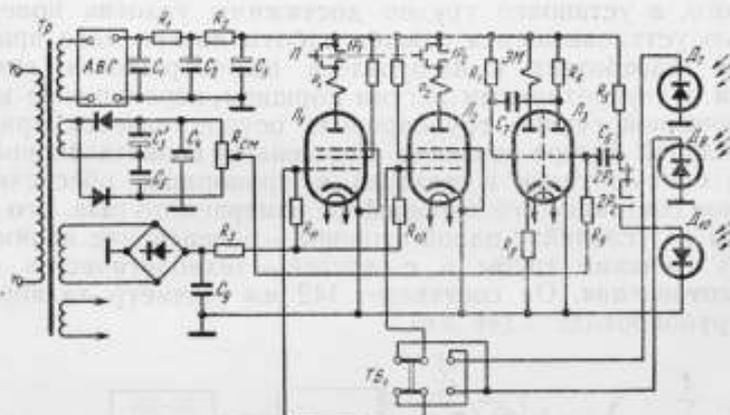


Рис. 2. Принципиальная схема электронно-счетного блока.

В ЭСБ шаропоршневой установки запуск и остановка формирующего блока (лампа L_3) и счетчика импульсов осуществляется кратковременным затемнением диода D_7 или D_8 в зависимости от направления движения поршня. При изменении направления движения поршня для обеспечения нормальной работы схемы необходимо переключить тумблер $ТБ_1$. В остальном работа ЭСБ шаропоршневой установки аналогична предыдущей.

Предварительные исследования шаропоршневой газомерной установки проводились с поршнями различных плотностей и диаметров по отношению к диаметру калиброванной секции трубопровода при

помощи газомерной установки колокольного типа. Полученные результаты позволяют предварительно оценить ее точность предельной погрешностью $\pm 0,5\%$.

Однако запас точности установки еще не исчерпан. Предстоит выполнить ряд исследовательских работ по оптимизации размеров и плотности поршня для достижения максимальной точности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павловский А. Н. Измерение расхода и количества жидкостей, газа и пара. М., Изд-во стандартов, 1967.
2. Афаджани Е. К., Свердлов Г. М., Ягудин Р. Ю. Автоматизация объектов нефтедобычи (зарубежный опыт). М., «Недра», 1966.
3. Jazek A. W. Mechanical Power Erases Doubt in Gas Measurement. „Oil and Gas J.” 1966, 64, № 25, 205—211.
4. Pierreh R. H. Proving Systems for P. D. Meter. „Oil and Gas J.” 1959, № 40.

ОБРАЗЦОВАЯ РАСХОДОМЕРНАЯ УСТАНОВКА С ЗАКРЫТОЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Прогресс авиации, машиностроения и других отраслей современной техники ставит перед метрологией задачу дальнейшего увеличения точности и надежности контроля расходов разнообразных жидких сред [1]. Наиболее остро это ощущается в расходомерии углеводородных и иных топлив, а также криогенных, токсичных, агрессивных и других специальных жидкостей, не допускающих прямого контакта с атмосферой и требующих применения установок с полностью закрытой гидравлической системой [2, 3].

Одна из наиболее точных в нашей стране расходомерных установок, разработанная ВНИИК, обладает классом точности 0,06 [4]. Однако она работает лишь на воде и не пригодна для работы на специальных жидкостях. Точность же известных установок с закрытой гидросистемой значительно ниже и обычно не превышает 0,5-1%. Кроме того, существенным недостатком известных весовых установок [2, 4, 5, 6] является то, что поток жидкости в них создается с помощью обращенного расходомера переменного перепада давления (т. е. сужения, на котором рассеивается основная часть энергии потока), а весы и часы используются лишь для послеопытного определения среднего расхода по интегральным величинам — количеству жидкости в весовом баке и времени его наполнения — и непосредственно в создании (или генерировании) самого потока и величины мгновенного расхода никакого участия не принимают.

Естественно, что такой метод создания расхода в установках является источником погрешностей того же порядка, что и для расходомеров переменного перепада давления, которые представляют хорошо изученные устройства. Отметим, что связь между перепадом давления на сужении Δp и массовым расходом G_m , в обоих случаях выражается одной и той же зависимостью:

$$G_m = \varphi F_0 \sqrt{2\rho\Delta p}. \quad (1)$$

Так как на сужении рассеивается значительная энергия, оно способно создавать колебания расхода в довольно широкой полосе частот (от 0 до f_{\max}) даже при поддержании „идеально“ постоянного перепада на нем. До некоторой предельной амплитуды эти колебания принципиально не обнаруживаются, поскольку отсутствуют независимо аттестуемые приборы мгновенного расхода, соизмеримого с установкой или превосходящего класса точности.

Рассмотрим принципиальную схему весовой установки, в которой предпринята попытка устранить указанные недостатки. Отметим основные моменты в ее структуре и работе.

1. Создание (или генерирование) потока жидкости. Если учесть, что метрологические качества объемно-тахометрических расходомеров почти на порядок, а плунжерных и винтовых гидромашин высокого давления на несколько порядков выше, чем у расходомера переменного перепада давления, то можно прийти к заключению, что перспективное устройство для создания высокостабильных потоков может быть получено путем обращения объемно-тахометрического расходомера.

Очевидно, мы приходим к схеме насосной подачи, незаслуженно забытой в прецизионной расходомерии.

Для оценки имеющихся здесь возможностей укажем, что стабильность скорости вращения современных электроприводов достигает величины 10^{-6} и более [7, 8], а плунжерные и винтовые гидромашин высокого давления имеют весьма жесткие характеристики и, следовательно, ничтожные утечки через зазоры. Кроме того, насосная подача компактна и не нуждается в напорном баке.

2. Стабилизация потока и величины мгновенного массового расхода. Электрическим аналогом расходомерной установки как по структуре, так и по функциям основных узлов является электронный стабилизатор напряжения или силы постоянного тока.

Непрерывные функции такого устройства [9] следующие:

а) пассивная (параметрическая) стабилизация, выполняемая обычно с помощью $L-C$ -фильтров (т. е. индуктивностей и емкостей), которые подавляют высокочастотные колебания тока или напряжения, и б) активная (автоматическая) стабилизация, выполняемая, как правило, с помощью источника образцового напряжения, органа сравнения и регулирующего транзистора, которые подавляют низкочастотные колебания или "дрейф" величины тока (напряжения).

В рассматриваемой установке применяется и пассивная, и активная стабилизация потока жидкости с целью подавления, соответственно, высокочастотных и низкочастотных колебаний расхода.

Аналогом электрического $L-C$ -фильтра в установке являются два гидроаккумулятора с газовой "подушкой" и соединяющий их дроссель, образующие П-образный фильтр высокочастотных колебаний.

Для активной стабилизации потока, подавления дрейфа мгновенного расхода и поддержания его величины на заданном (номинальном, "эталонируемом") уровне в установке применен разработанный авторами метод, который можно определить как метод активного и непрерывного (или достаточно частого) использования основных инструментов — весов и часов — для задания и стабилизации образцовых величин мгновенных расходов.

Сущность метода заключается в следующем. В расходомерной установке (рис. 1) в течение всего времени наполнения весового бака производится ступенчатая загрузка весов гирями, уравновешива-

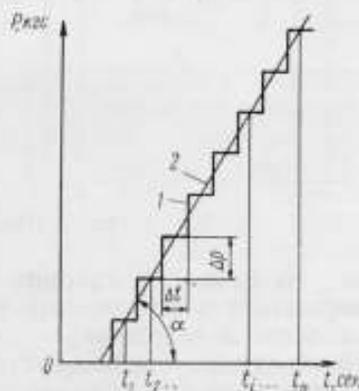


Рис. 1. Характеристика нагружения весов.

вающими вес поступающей в бак жидкости, так, что средний наклон характеристики нагружения I равен заданной или номинальной величине расхода, т. е.:

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \lg \alpha = G_{ном}. \quad (2)$$

По мере поступления жидкости в мерный бак весы периодически проходят через положения равновесия, что на рис. 1 соответствует пересечениям характеристики 2 (веса жидкости, поступившей в бак) с горизонтальными участками характеристики нагружения I в моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n$. Эти моменты времени достижения весами равновесных положений сравниваются с помощью автоматики с теоретически необходимыми моментами, и величины рассогласования используются для корректировки действительной величины расхода (и исключения тем самым его отклонений от $G_{ном}$).

Рассмотрим схему и работу установки (рис. 2). Она состоит из питающего бака I , рабочего насоса 2, фильтра высокочастотных колебаний 3, весов 4 с мерным баком 5 и автоматическим дискретным нагрузителем (АДН) 6, оптической головки 7, схемы управления 8, корректирующего насоса 9 и ряда вспомогательных устройств.

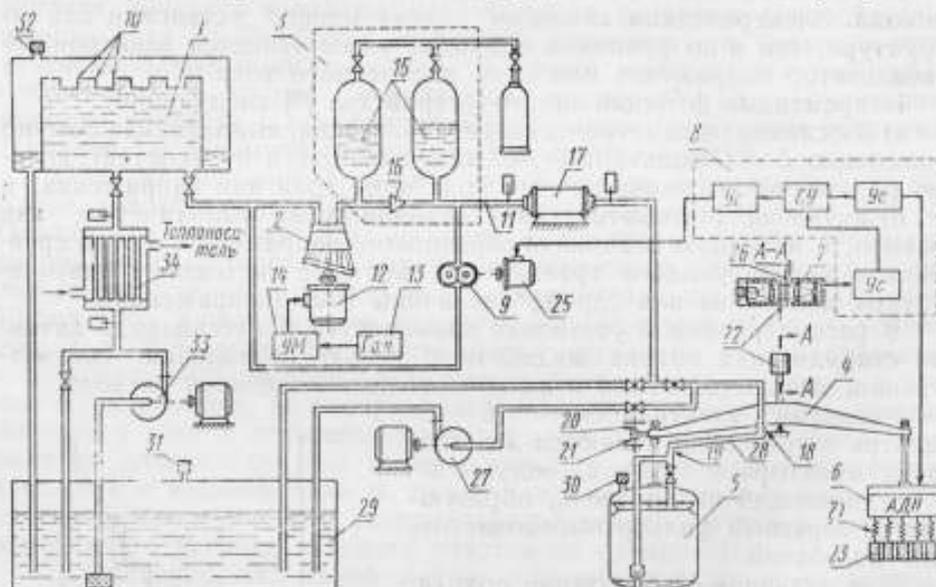


Рис. 2. Принципиальная схема установки.

Из бака I , в котором с помощью развитого „водослива“ 10 поддерживается постоянный уровень, рабочая жидкость прокачивается насосом 2 в основную гидравлическую магистраль установки 11. Необходимая стабильность скорости вращения насоса обеспечивается с помощью привода его от синхронного электродвигателя 12, блок питания которого состоит из генератора образцовой частоты 13 и усилителя мощности 14. При этом необходимая величина расхода устанавливается изменением производительности насоса 2 или скорости вращения двигателя 12.

Высокочастотные колебания расхода, источником которых может быть остаточная неравномерность подачи насоса 2 в пределах одного

оборота и резонансные явления в трубопроводах, гасятся с помощью демпфера 3, состоящего из двух баллонов — гидроаккумуляторов с газовой „подушкой“ 15 и сужающего устройства или дросселя 16. Действие демпфера ясно из схемы.

Пройдя поверяемый расходомер 17 и упругие элементы (сильфоны) 18, 19, поток жидкости поступает в мерный бак 5.

Ход коромысла весов 4 ограничен неподвижными упорами 20, 21 таким образом, что оно может колебаться около своего положения равновесия в пределах половины шага дифракционных решеток 22, 26 (несколько микрометров). Так что, при превышении веса жидкости над весом гирь (в пределах чувствительности весов) коромысло находится в одном крайнем положении, и дифракционные решетки пропускают максимум светового потока, а при превышении веса гирь коромысло весов переходит в другое крайнее положение, и световой поток перекрывается штрихами подвижной дифракционной решетки 22. Соответственно этому оптическая головка 7 вырабатывает сигналы высокого и низкого уровня. В моменты прохождения весами равновесных положений (при наполнении мерного бака) вид сигнала, выдаваемого оптической головкой, меняется на противоположный, что и дает возможность фиксировать эти моменты времени.

Автоматический дискретный нагрузчитель (АДН) представляет регистр электромагнитных замков, управляемых кодовыми посылками схемы управления 8. В зависимости от кода включается та или иная комбинация замков, подвешивающая к весам необходимый набор гирь 23. Для исключения влияния инерционности гирь, которая может проявиться при переключениях, электромагнитные замки соединены с гирями пружинами 24.

Сигналы, вырабатываемые оптической головкой 7, направляются в схему управления 8, где время их фактического появления сравнивается с теоретически необходимым и в зависимости от величины рассогласования изменяется напряжение, питающее электродвигатель 25 тока. Тем самым корректируется производительность насоса 9, работающего параллельно с основным насосом 2, и, следовательно, величина расхода в магистрали 11. Максимальная производительность насоса 9 имеет порядок $10^{-2} - 10^{-3}$ от производительности насоса 2, так как его задачей является лишь тонкая стабилизация расхода в масштабе медленного „дрейфа“.

Подача жидкости в бак 5 и ее откачка (насосом 27) производятся в целях уменьшения погрешностей по одному трубопроводу 28, а его упругие элементы 18, 19 размещены на осях вращения коромысла и подвески бака 5. При этом баки 1, 5 и сливной резервуар 29 соединены с атмосферой с помощью сапунов 30, 31, 32. Если же рабочая жидкость требует полной герметизации, то газовые полости баков 1, 5, 29 объединяются дренажной системой, и бак 5 соединяется с неподвижной частью системы вторым трубопроводом с гибкими элементами. Из сливного резервуара 29 насосом 33 рабочая жидкость подается через теплообменник 34 в питающий бак 1.

Схема управления 8 состоит из аналоговых и цифровых электронных блоков, создающих необходимую цикличность в работе установки и управляющих АДН, корректирующим электродвигателем 25 и вспомогательными системами.

Установка может быть применена также для работы на воде и других неагрессивных жидкостях. При этом необходимость в трубопроводе 28 отпадает, и жидкость может подаваться в мерный бак 5 открытой струей.

О точности установки. Как известно из теории автоматического регулирования [7], статическая точность системы регулирования (САР) определяется главным образом точностью следующих четырех узлов: источника образцовых (эталонных) сигналов, делителя-задатчика, преобразователя цепи обратной связи и органа сравнения, погрешности которых мы обозначим, соответственно, через δ_{ac} , $\delta_{дз}$, δ_{op} и δ_{oc} . Тогда суммарная погрешность установки δ_c может быть определена по формуле [10]

$$\delta_c = \sqrt{\delta_{ac}^2 + \delta_{дз}^2 + \delta_{op}^2 + \delta_{oc}^2}. \quad (3)$$

В нашем случае в качестве своеобразного эталона расхода выступает величина $\frac{\Delta P}{\Delta t}$, погрешность которой всецело определяется погрешностями примененных гирь (ΔP), так как ошибка временного интервала Δt , полученного делением образцовой частоты кварцевого генератора, по крайней мере на 1 ÷ 2 порядка меньше, и ею можно пренебречь. В качестве преобразователя цепи обратной связи в установке выступает мерный бак 5, который теоретически не вносит никаких погрешностей, ибо он интегрирует мгновенный расход абсолютно точно. Наконец, погрешность органа сравнения — это погрешность весов 4.

Если принять, что ошибки образцовых гирь и весов не превосходят $5 \cdot 10^{-5}$, что примерно соответствует современным возможностям, то суммарная погрешность установки может быть оценена величиной $\sim 10^{-4}$ или 0,01%.

Необходимые динамические качества установки, в частности полоса пропускания частот САР и ее устойчивость, обеспечиваются малым ходом коромысла весов 4 (микрометры) и корректирующими цепями в схеме управления 8.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хаблов В. С. Измерительная техника*, 1968, № 7.
2. Вискнеп R. L. Calibration Systems and Turbine Type Flow Transducers for Cryogenic Flow Measurement, „Advances in Cryogenic Engineering“, vol. 8, New York.
3. Aerospace Safety, vol. 21, № 11, p. 2-5, 1965.
4. Павловский А. Н., Цейтлин В. Г. Испытательная расходомерная установка ВНИИК. В сб. „Новые измерительные приборы и методы их поверки“. М., Стандартгиз, 1961.
5. Павловский А. Н. Измерение расхода и количества жидкостей, пара и газа. М., Изд-во стандартов, 1967.
6. Таршиш М. С. Контроль гидравлических сопротивлений. М., „Машиностроение“, 1966.
7. Богорад Г. З., Киблицкий В. А. Цифровые регуляторы и измерители скорости. Библиотека по автоматике, вып. 197, М.—Л., „Энергия“, 1966.
8. Лесли У. Х. П. Система точного измерения момента с балансирной машинной. Тр. I Международного конгресса Международной федерации по автоматическому управлению, т. 4. „Технические средства автоматизации“. АН СССР, М., 1961.
9. Додик С. Д. Полупроводниковые стабилизаторы постоянного напряжения и тока. М., Советское радио, 1962.
10. Зайдель А. Н. Элементарные оценки измерений. Л., „Наука“, 1967.

ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СМЕСЕЙ

В нефтяной и газовой промышленности в связи с широким внедрением прогрессивной системы однотрубного сбора и транспортировки нефти и газа возникла необходимость в простом и надежном способе измерения расхода смеси непосредственно в потоке. Весьма перспективным представляется способ, основанный на методе переменного перепада давления, создаваемого с помощью цилиндрических насадок. Тем более, что для регулирования работы пласта на устье фонтанирующих скважин всегда устанавливают штуцера, представляющие собой именно цилиндрические насадки [1].

Истечение газожидкостных смесей через цилиндрические насадки имеет свои особенности и значительно отличается от истечения однофазных потоков. Однако многие из этих особенностей, как и сам процесс истечения, мало изучены [2].

Вместе с тем не меньшее значение имеет исследование расхода газожидкостных смесей распространенным для однофазных жидкостей способом камерных диафрагм.

Экспериментальные исследования проведены на лабораторной установке и в промысловых условиях на нефтяной фонтанирующей скважине.

Термодинамический характер процесса расширения двухфазной смеси определяется из уравнения состояния, которое при отсутствии скольжения фаз и изэнтропичности истечения имеет вид

$$p \left(v \frac{\beta}{x} \right)^m = \text{const}, \quad (1)$$

где показатель процесса

$$m = \frac{(1-x) C_{vж} + x C_{pг}}{(1-x) C_{vж} + x C_{vг}}. \quad (2)$$

Здесь v — удельный объем смеси;

β , x — газосодержание объемное и массовое соответственно;

$C_{vж}$ — удельная теплоемкость жидкости при постоянном объеме;

$C_{pг}$, $C_{vг}$ — удельные теплоемкости газа при постоянном давлении и постоянном объеме соответственно.

Аналогично однофазному газовому потоку скорость истечения двухфазной смеси через цилиндрические насадки ограничивается величиной скорости звука смеси [3]. В этой связи получено уравне-

ние скорости распространения звука в газожидкостной смеси с учетом теплообмена между фазами и в допущении гомогенности потока:

$$a = \sqrt{\frac{m p}{\rho^2}}, \quad (3)$$

где ρ — плотность смеси.

Для определения критической скорости истечения использовалась следующая методика проведения опытов. Предварительно устанавливали такой режим истечения, при котором отношение статических давлений $\varepsilon = p_2/p_1$, было заведомо меньше критического. При этом расход жидкости поддерживался регулятором расхода, а на линии, подводящей воздух к смесителю, запорная арматура была полностью открыта, так что расход воздуха устанавливался максимально возможным при данном режиме истечения. Затем постепенно повышали давление после насадка, наблюдая за изменением расходов жидкости, воздуха и давления перед насадком. До тех пор пока давление было меньше критического, давление перед насадком и расходы жидкости и газа оставались неизменными. Как только p_2 становилось больше критического, отмечалось повышение давления перед насадком и падение расхода воздуха. Начало изменения расхода воздуха и давление перед насадком соответствуют переходу из критической области истечения в докритическую. Отношение давлений $\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{кр}$, соответствующее началу этого перехода, является критическим отношением $\varepsilon_{кр}$; при этом скорость смеси в выходном сечении насадка — критическая.

Исследованиями установлено, что с уменьшением газосодержания критическое отношение давлений снижается (рис. 1).

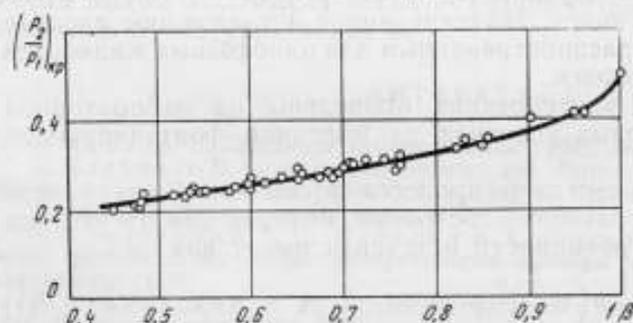


Рис. 1. Зависимость критического отношения давления воздуховодящей смеси от газосодержания при $p_{кр} = 0,12 - 0,16 \text{ Мн/м}^2$.

Значения критической скорости смеси при низком критическом давлении, полученные автором (рис. 2), расположены несколько выше значений скорости звука, вычисленных по формуле (3). Объясняется это, по-видимому, наличием относительного движения фаз в насадке.

Анализ результатов промышленных исследований по истечению газонефтяных смесей через устьевые штуцера фонтанирующих скважин показал, что при высоких критических давлениях (по крайней мере выше 5 Мн/м^2) практически отсутствует относительное движение фаз, и критическая скорость истечения с достаточной точностью может быть определена по формуле (3). Таким образом, для точного определения критической скорости газожидкостной смеси необходимо знать величину относительной скорости фаз.

В докритическом режиме опыты проводились при постоянном

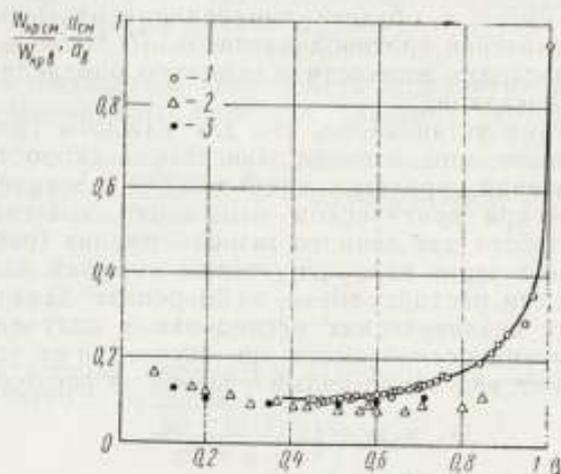


Рис. 2. Зависимость относительной критической скорости воздуховодяной смеси от газосодержания:

1 — значения, полученные автором; 2, 3 — данные (3) по скорости звука в воздуховодяной смеси при $p_1 = 0,125 \text{ Мн/м}^2$ и $p_2 = 0,2 \text{ Мн/м}^2$.

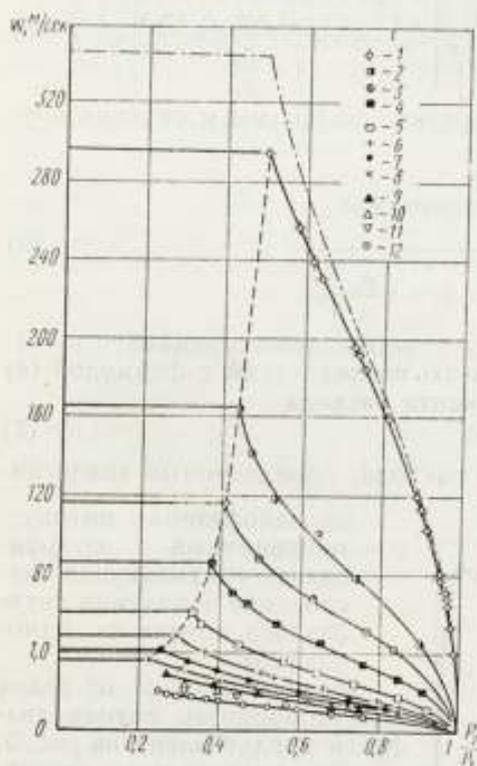


Рис. 3. Зависимость скорости истечения смеси w от p_2/p_1 , при $p_2 = 0,137 \text{ Мн/м}^2$ для значений β : 1 — 1; 2 — 0,98; 3 — 0,95; 4 — 0,9; 5 — 0,8; 6 — 0,7; 7 — 0,6; 8 — 0,5; 9 — 0,4; 10 — 0,3; 11 — 0,2; 12 — 0.

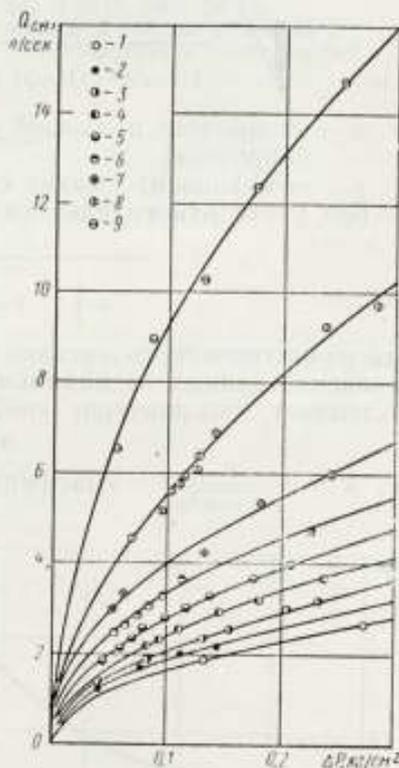


Рис. 4. Зависимость расхода смеси от перепада давления на диафрагме ($m = 0,3$) для значений β : 1 — 0; 2 — 0,2; 3 — 0,3; 4 — 0,4; 5 — 0,5; 6 — 0,6; 7 — 0,7; 8 — 0,8; 9 — 0,9.

газосодержании смеси в области изменения β от 0 до 1 для двух фиксированных значений противодавления 0,137 Мн/м² и 0,294 Мн/м² при различных расходах жидкости и газа, что определяло величину давления перед насадком.

Экспериментами установлено, что для каждого газосодержания имеется своя вполне определенная зависимость скорости истечения от перепада давлений, причем с уменьшением ε величина скорости растет, достигая при критическом отношении давлений величины критической скорости для данного газосодержания (рис. 3).

При истечении через диафрагму также имеются вполне определенные зависимости расхода смеси от перепада давления (рис. 4).

В результате аналитических исследований получено уравнение для расхода газожидкостной смеси при истечении ее через диафрагму, которое имеет вид аналогичный уравнению расхода газа

$$Q_{см} = \alpha \varepsilon_p F \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}, \quad (4)$$

где α — коэффициент расхода;

F — площадь отверстия диафрагмы;

ε_p — коэффициент расширения,

который для изотермического истечения смеси без учета относительного движения фаз имеет вид

$$\varepsilon_p = \sqrt{\frac{1 - \mu^2 m^2}{1 - \mu^2 m^2 \left[(1 - \beta) + \beta \frac{p_2}{p_1} \right]^2} \left[(1 - \beta) - \frac{\beta \frac{p_2}{p_1}}{1 - \frac{p_2}{p_1}} \ln \frac{p_2}{p_1} \right]}, \quad (5)$$

где m — отношение площадей отверстия диафрагмы и сечения трубопровода;

μ — коэффициент сжатия струи.

Без учета относительного движения фаз

$$\mu = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left[(1 - \beta) + \beta \frac{p_2}{p_1} \right] m^2}}. \quad (6)$$

Для цилиндрического насадка $l/d > 4$ необходимо принимать $\mu = 1$. Сравнение данных экспериментальных исследований с формулой (4) показывает, что значение коэффициента расхода

$$\alpha = \alpha' \psi', \quad (7)$$

где $\alpha' = \frac{\mu}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}}$ — коэффициент расхода, определяемый аналогично

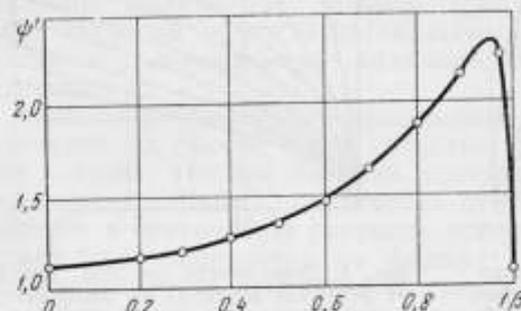


Рис. 5. Зависимость ψ' от β для диафрагм ($m = 0,3$).

но однофазному потоку; ψ' — поправочный коэффициент, учитывающий отклонение поведения двухфазного потока от однофазного.

Зависимость ψ' от β для воздуховодяного потока диафрагм представлена на рис. 5.

Для установления зависимости коэффициента расхода α от основных параметров и свойств потока требуется весьма большая эксперимен-

тальная работа. При истечении смеси через насадки, если известны критические параметры потока $w_{кр}$ и $\epsilon_{кр}$, задача значительно облегчается.

Получена обобщенная зависимость безразмерной скорости истечения от безразмерного перепада давления, которая описывается уравнением

$$\frac{w}{w_{кр}} = \sqrt{\frac{0,0326(1-B)}{0,885B + 0,115} - 0,763 \lg(0,885B + 0,115)}, \quad (8)$$

где

$$B = \frac{\epsilon - \epsilon_{кр}}{1 - \epsilon_{кр}}.$$

Если критические параметры известны при одном давлении, то для любого другого давления

$$w' = w \left(\frac{p_2'}{p_2} \right)^{n/2}, \quad (9)$$

где $n = (1 - \beta^3)^{0,42}$.

Этот метод расчета скорости имеет погрешность $\pm 5\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гужов А. И., Медведев В. Ф. „Нефть и газ“, 1966, № 12.
2. Гужов А. И., Медведев В. Ф. „Нефтяное хозяйство“, 1968, № 5.
3. Семенов Н. И., Костерин С. И. „Теплоэнергетика“, 1964, № 6.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ДВИЖЕНИЯ СЖИЖЕННЫХ
ГАЗОВ В ТРУБОПРОВОДАХ

В практике работы заводов, где получают или используют сжиженные газы, приходится иметь дело с трубопроводами, в которые газ поступает в насыщенном состоянии, т. е. на входе в трубопровод давление равно давлению насыщения при данной температуре. К таким, например, относятся некоторые трубопроводы холодильных установок, межцеховые и межзаводские—сжиженного газа, а также связывающие емкости и насосные установки.

В последние годы трубопроводы, работающие в подобном режиме, начали использоваться для передачи сжиженных газов на большие расстояния.

При движении сжиженного газа по трубопроводу меняются его основные термодинамические параметры—давление и температура, определяющие его состояние. С момента, когда давление сжиженного газа уменьшится до значения, соответствующего давлению насыщения в трубопроводе, начнется газообразование, степень которого будет увеличиваться при дальнейшем отклонении параметров состояния от параметров насыщения, определяемых его составом. Кроме того, в подобном трубопроводе вся жидкость может превратиться в пар, и трубопровод сжиженного газа станет газопроводом.

В статье освещаются некоторые вопросы теории движения сжиженного газа в такого рода трубопроводах с целью определения участков для установки расходомерных устройств, на которых не будет иметь место появление другой фазы. Кроме того, вопросы исследования газосодержания на двухфазном участке его работы, как и вопросы гидравлических потерь, также имеют большое значение при расчетах систем транспортировки сжиженных газов, в том числе и расходомерных установок.

Принятые обозначения

- $p_0, T_0; p_k, T_k$ — давление и температура в начале и конце трубопровода;
 $p_1, T_1; p_2, T_2$ — давление и температура в начале и конце рассматриваемого участка;
 $p_{нас}, T_{нас}; p_{кр}, T_{кр}$ — параметры насыщения и критические;
 $T, T_{гр}, T_{нар}$ — температура потока, грунта и наружная температура;
 $v_ж, v_г, v_{см}$ — скорость жидкости, газа, смеси;
 $\gamma_ж, \gamma_г, \gamma_{см}$ — удельный вес жидкости, газа, смеси;

$c_{ж}, c_{г}, c_{см}$ — теплоемкость жидкости, газа, смеси;
 $K_{ж}, K_{г}, K_{см}$ — коэффициент теплопередачи в случае движения потоков жидкости, газа, смеси;
 $G_{ж}, G_{г}, G$ — весовой расход жидкой и газовой фаз и общий расход;
 A, B, C — постоянные уравнения Антуана, определяемые составом газа;
 $l, l_{нач}, l_{уст}$ — общая длина газопровода, длина начального участка и длина участка установки расходомера;
 $\lambda_{ж}, \lambda_{г}, \lambda_{см}$ — коэффициент линейного гидравлического сопротивления при движении жидкости и смеси;
 $\beta_{т}, \beta_{р}$ — коэффициенты температурного расширения и сжимаемости;

$$\beta = \frac{G_{г}}{G} = \frac{G_{г}}{G_{ж} + G_{г}} \text{ — весовое газосодержание;}$$

$x_{1}, g_{1}, x_{2}, g_{2}, \dots, x_{n}, g_{n}$ — концентрация молярная и весовая компонентов сжиженного газа;
 $M_{1}, M_{2}, \dots, M_{n}$ — молекулярный вес компонентов;
 z — коэффициент сжимаемости газа;
 $V_{см}, V_{г}$ — объем смеси и газа;
 $\Delta p, \Delta p_{ж}, \Delta p_{см}$ — перепад общий, на жидкостном и на двухфазном участке;
 ω — площадь живого сечения потока;
 $\zeta_{р}$ — коэффициент гидравлического сопротивления расходомерного устройства;
 g — ускорение силы тяжести.

В практике работы данных трубопроводов наиболее характерным является случай, когда температура продукта падает вдоль трассы. В подобном режиме, например, работает трубопровод, уложенный в земле. В этом случае происходит следующее: падение давления вдоль трубопровода сдвигает систему в сторону газообразования, а падение температуры — в сторону конденсации. При этом образуется участок, на котором будет отсутствовать газообразование, хотя продукт вошел в трубопровод в состоянии насыщения. Выделим на начальном участке (рис. 1) трубопровода элемент dl . В процессе движения сжиженного газа на этой длине давление падает на $\Delta p = p_1 - p_2$, а температура — на $\Delta T = T_1 - T_2$.

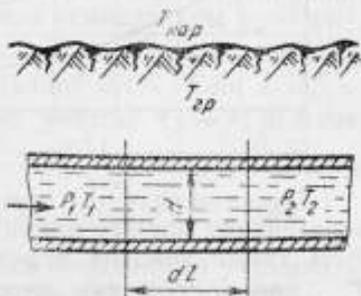


Рис. 1. Схема участка трубопровода сжиженного газа.

Рассмотрим уравнения:
 гидравлического сопротивления —

$$dp = -\lambda_{ж} \frac{dl}{d} \frac{v_{ж}^2}{2g} \gamma_{ж}, \quad (1)$$

теплопередачи —

$$dq = KdF(T - T_{нар}) = K\pi d(T - T_{нар}) dl, \quad (2)$$

теплообмена внутри потока —

$$dq = c_{ж} G dT, \quad (3)$$

кривой насыщения —

$$p_{н} = Ae^{-\frac{B}{C+T}}. \quad (4)$$

Система этих уравнений определяет длину начального участка, на котором будет отсутствовать газообразование.

Систему можно решить следующим образом.
Из уравнения (1)

$$p = p_0 - \lambda_{ж} \frac{v_{ж}^2}{2gd} l \gamma_{ж}. \quad (5)$$

Из (2), (3), (4)

$$\lg \frac{p_{кр}}{A} = - \frac{0,434B}{C + T_{нар} + e^{\frac{e_{ж} G}{\pi K d}} (T_0 - T_{нар}) l}. \quad (6)$$

При $l = l_{нач}$ и $p = p_{кр}$ имеем:

$$p_{кр} = p_0 - \lambda_{ж} \cdot \frac{v_{ж}^2}{2gd} \cdot \gamma_{ж} \cdot l_{нач}, \quad (7)$$

$$\lg \frac{p_{кр}}{A} = - \frac{0,434B}{C + T + e^{\frac{e_{ж} G}{\pi K d}} (T_0 - T_{нар}) l_{нач}}. \quad (8)$$

На рис. 2 представлена графическая форма зависимости выражения (5) — кривая 1 и (6) — кривая 2, построенных для магистрального трубопровода пропана со следующей общей характеристикой: $T_{кр} = 280^\circ$, $G = 15$ т/сутки, $d = 104$ мм.

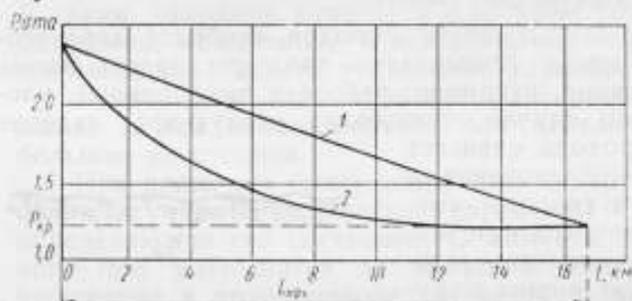


Рис. 2. Начальный участок трубопровода сжиженного пропана.

Длина начального участка в этом случае равна абсциссе точки пересечения данных линий 1 и 2. Длина начального участка может быть также найдена через значения критических параметров $p_{кр}$ и $T_{кр}$, при достижении которых в трубопроводе начинается процесс газообразования.

В этом случае решение уравнений (1), (2) и (3) имеет вид

$$p = p_0 - \lambda_{ж} \cdot \frac{v_{ж}^2 \gamma_{ж} e_{ж} G}{2gd^2 \pi K} l \left(\frac{T - T_{нар}}{T_0 - T_{нар}} \right). \quad (9)$$

На рис. 3 критические параметры продукта для указанного выше трубопровода определяются как точки пересечения линий 1 и 2, построенных по зависимостям (4) и (9).

Значение критических $p_{кр}$ и $T_{кр}$ может быть найдено при решении уравнений (10), (11), вытекающих из (9) и (4) при $p = p_{кр}$, $T = T_{кр}$ и $l = l_{нач}$:

$$p_{кр} = p_0 - \lambda_{ж} \cdot \frac{v_{ж}^2 \gamma_{ж}}{2gd^2} \cdot \frac{e_{ж} G}{\pi \cdot K} l_{нач} \left(\frac{T_{кр} - T_{нар}}{T_0 - T_{нар}} \right), \quad (10)$$

$$p_{кр} = A e^{-\frac{B}{C + T_{кр}}}. \quad (11)$$

При определении $p_{кр}$ из (10) и (11) можно, пользуясь выражением (7), подсчитать длину начального участка.

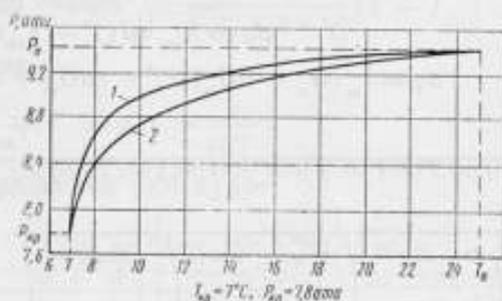


Рис. 3. Критические параметры трубопровода сжиженного пропана.

Для практических расчетов, если принять, что $T_{кр} = T_{гр}$ рекомендуется формула

$$l_{нач} = \frac{p_0 - Ae^{-\frac{B}{C+T_{кр}}}}{\lambda_{ж} \frac{v_{ж}^2}{2gd} \gamma_{ж}} \quad (12)$$

Коэффициент сопротивления $\lambda_{ж}$ может быть выбран, согласно рекомендаций [1].

Если в приведенных выше зависимостях учитывать изменение удельного веса сжиженного газа от изменения температуры $\gamma_{ж} = \gamma(t)$, то значение $l_{нач}$ становится несколько большим. Однако погрешность при допущении постоянства $\gamma_{ж}$ составляет 0,4%. Еще к меньшей погрешности приводит пренебрежение учетом $\gamma_{ж} = f(p)$, так как коэффициент сжиженных газов $\beta_p = \sim 10^{-6} \frac{1}{атм}$ на два порядка ниже, чем коэффициент температурного расширения $\beta_t = \sim 10^{-4} \frac{1}{град}$.

При установке расходомерных устройств необходимо учитывать потерю напора в приборе, что приводит к уменьшению величины $l_{нач}$, вычисленной по формуле (12).

В этом случае (12) может быть представлена в виде:

$$l_{уст} = \frac{p_0 - Ae^{\frac{B}{C+T_{кр}}} - \zeta \frac{v_{ж}^2}{2g} \gamma_{ж}}{\lambda_{ж} \frac{v_{ж}^2}{2gd} \gamma_{ж}} \quad (13)$$

При движении многокомпонентного газа значение p_n принимается по закону Рауля для смеси газов, т. е. $p_n = \sum p_{ni} \cdot x_i$.

При понижении давления $p < p_{кр}$ при $T < T_{кр}$ в газопроводе начинается газообразование. Рассмотрим движение двухфазной смеси с отсутствием скольжения, т. е. $v_{ж} = v_{г}$. Это близко к действительности, так как в потоках сжиженных газов с фазовыми превращениями нарушение равновесного состояния системы приводит систему в новое соответствие.

Уравнения (1), (2), (3) и (4) для элемента (рис. 4) имеют вид:

$$\frac{dp}{\gamma_{см}} = -\lambda_{см} \frac{dl}{d} \frac{v_{см}^2}{2g}, \quad (14)$$

$$dq = K_{см} \pi d (T - T_{гр}) dl, \quad (15)$$

$$dq = c_{ж} (G_{ж} - dG_{ж}) dT + rdG_{ж} + c_r (G_{газ} + dG_{газ}) dT, \quad (16)$$

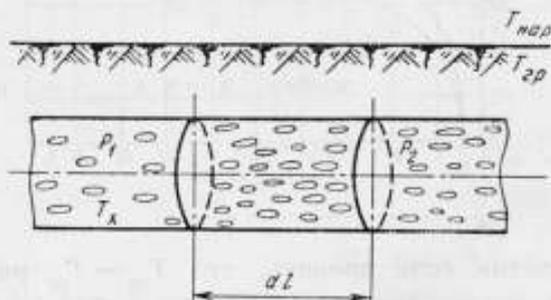


Рис. 4. Схема участка сжиженного газа при наличии фазовых превращений.

$$p = Ae^{-\frac{B}{C+T}}. \quad (17)$$

Если расход двухфазного потока G , то

$$G = G_{ж} + G_r.$$

Отсюда

$$G_{ж} = G - G_r.$$

Преобразовывая (16), с учетом

$$dG_{ж} = dG_r = dG$$

и пренебрегая $dG_r \cdot dT$ и $dG_{ж} \cdot dT$, как бесконечно малыми второго порядка, имеем:

$$dq = G \left(c_{ж} \frac{G - G_r}{G} + c_r \frac{G_r}{G} \right) dT + rdG. \quad (18)$$

Значения газосодержания $\beta = \frac{G_r}{G}$ или $d\beta = \frac{dG_r}{G}$ приводят к следующей зависимости:

$$dq = G [c_{ж} (1 - \beta) + c_r \beta] dT + Grd\beta. \quad (19)$$

Так как количество теплоты, выделившееся в потоке на участке dl , равно количеству тепла, переданного в окружающую среду, то с учетом (15) и (14)

$$G [c_{ж} (1 - \beta) + c_r \beta] dT + Grd\beta = \frac{2gd^2 \pi K_{см} (T - T_{гр})}{v_{см}^2 \gamma_{см} \lambda_{см}} dp. \quad (20)$$

Поскольку удельный вес смеси

$$\gamma_{см} = \frac{\gamma_r \cdot \gamma_{ж}}{\beta (\gamma_{ж} - \gamma_r) + \gamma_r}, \quad (21)$$

то скорость смеси

$$v_{см} = \frac{G}{\gamma_{см} \cdot \omega}, \quad v_{см} = \frac{G [\beta (\gamma_{ж} - \gamma_r) + \gamma_r]}{\gamma_r \cdot \gamma_{ж} \cdot \omega}. \quad (22)$$

Уравнение (20) с учетом (21) и (22) приводится к виду

$$G[c_{ж}(1-\beta) + c_r\beta] dT + Grd\beta + 2\pi g d^2 \frac{K_{см} \cdot \omega \cdot \gamma_r \gamma_{ж}}{G^2 \beta (\gamma_{ж} - \gamma_r) + \gamma_r} (T - T_{гр}) dp = 0.$$

Так как для газовой фазы

$$\frac{p}{\gamma_r} = zRT \text{ или } \gamma_r = \frac{p}{zRT},$$

то окончательная форма уравнения (20) будет

$$[c_{ж}(1-\beta) + c_r\beta] dT + rd\beta - \frac{8K_{см} g \gamma_{ж} A^2 B (T - T_{гр}) e^{-\frac{B}{C+T\omega^2}}}{\lambda_{см} \cdot G^3 [\beta (\gamma_{ж} \cdot zRT e^{-\frac{B}{C+T}} - A) + A] (C+T)^2} dT = 0. \quad (23)$$

Уравнение является дифференциальной формой зависимости $\beta = f(T)$ для случая движения потока сжиженного газа при наличии фазовых превращений.

Уравнение (23) включает величины, которые могут быть определены, исходя из состава сжиженного газа и условий работы трубопровода. В (23) входят величины $K_{см}$ и $\lambda_{см}$, значения которых также изменяются с изменением газосодержания смеси. Величина коэффициента теплопередачи смеси $K_{см}$ занимает промежуточное значение между $K_{ж}$ и K_r , т. е. $K_r < K_{см} = K_{ж}$.

Для условий работы трубопроводов, уложенных в земле, эти величины одного порядка. Например, согласно работе [2], коэффициент теплопередачи для нефтепровода, уложенного в глинистом грунте $K_{ж} = 2 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{час}^\circ \text{С}}$, а для газопровода, работающего в тех же условиях $K_r = 1,3 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{час}^\circ \text{С}}$.

В связи с этим, включенная в уравнение (23) величина $K_{см}$ как средняя от значений K_r и $K_{ж}$ не приведет к существенным ошибкам.

Более сложным вопросом является нахождение наиболее приемлемых форм для введения в уравнение (23) значения коэффициента гидравлического сопротивления $\lambda_{см}$, общая зависимость для которого имеет вид

$$\lambda_{см} = f\left(\beta, Re_{см}, F_{r см}, W_{см}, \frac{\Delta}{d}, \cos \theta\right), \quad (24)$$

аргументы которой непрерывно меняются.

Анализ взаимозависимости газосодержания и коэффициента сопротивления смеси и на этой основе интегрирование уравнения (24) для некоторых случаев движения газожидкостных потоков при наличии фазовых превращений являются отдельным исследованием.

При работе трубопроводов сжиженного газа с фазовыми превращениями большое значение имеет определение давления в любой точке двухфазного участка, так как это позволит решить вопрос о потерях напора.

Для нахождения зависимости $p = f(l)$ необходимо к системе, учитывающей изменение давления вследствие гидравлических потерь, присоединить уравнение, дающее зависимость $p = f(\beta)$.

Физическим аналогом состояния газожидкостной многокомпонентной смеси в газопроводе является емкость переменного объема

$$T_{см} = \text{const} \text{ и } V_{см} = \text{var}.$$

Полагаем, что:

$g_{1,0}, g_{2,0}, \dots, g_{n,0}$ — состав исходной жидкой фазы, причем $\sum_i^n g_{i,0} = 1$;

g_1, g_2, \dots, g_n — текущий состав газовой смеси;

температура смеси $T_{см} = \text{const}$;

давление каждого компонента $p_1, p_2, \dots, p_n = \text{const}$.

Принимаем за основу:

уравнение состояния реального газа —

$$p_i^r V = z_i g_i^r R_i T, \quad (25)$$

давление i — компонента в газовой среде (закон Рауля) —

$$p_i^r = p_i \frac{g_i}{M_i} \frac{1}{\sum \frac{g_i}{M_i}}, \quad (26)$$

выражение для полной концентрации каждого компонента в жидкой среде —

$$x_n = \frac{g_n}{M_n} \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{M_i}}. \quad (27)$$

Сделав соответствующие преобразования, приходим к соотношению

$$\frac{C_1 g_1}{g_{1,0} - g_1} = \frac{C_2 g_2}{g_{2,0} - g_2} = \dots = \frac{C_n g_n}{g_{n,0} - g_n}. \quad (28)$$

где $C_i = \frac{\mu_i}{z_i}$ — постоянная при данной температуре.

Задаваясь текущими значениями g_i любого из компонентов, можно из уравнения (28) получить значение p_i любого из компонентов.

Общее давление смеси определяется как

$$P_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n p_i(g_i) = p(\beta). \quad (29)$$

Найденная зависимость (28) позволяет решить вопрос об определении общего гидравлического сопротивления в трубопроводе сжиженного газа, которое выражается: $\Delta p = p_0 - p_x = \Delta p_{ж} + \Delta p_{см}$.

Из рис. 2 следует, что точка, в которой начнется процесс газобразования в трубопроводе, соответствует условию в потоке $T = \text{const}$. Это может быть только при $T = T_{гр}$.

Давление смеси в этом случае осуществляется за счет перехода части энергии потока, затрачиваемой на гидравлические сопротивления, в тепловую (теплоту испарения). Исходя из этого можно записать:

$$r d\beta = \frac{1}{A_s} \frac{\lambda_{см}}{d} \frac{v_{см}^2}{2g} dl. \quad (30)$$

Учитывая (22), записываем дифференциальное уравнение в окончательном виде

$$rd\beta = \frac{\lambda_{см}}{A_3} \cdot \frac{G^2}{2gd\omega^2} \left(\frac{B(\gamma_{ж} - \gamma_r) + \gamma_r}{\gamma_{ж} \gamma_r} \right)^2 dl. \quad (31)$$

Интегрируя (31), получим

$$\beta = \frac{1}{\gamma_{ж} - \gamma_r} \left(\frac{1}{\gamma_r} - \frac{G^2}{2A_3 gd\omega^2} \cdot \frac{l}{\gamma_r^2 \cdot \gamma_{ж}^2} \cdot \frac{\lambda_{см}(\gamma_{ж} - \gamma_r)}{r} - \gamma_r \right). \quad (32)$$

Перепад давления на двухфазном участке трубопровода определяется из уравнения

$$\Delta p_{см} = \int_0^{l-l_{нач}} \frac{\lambda_{см}}{2gd} v_{см}^2 \gamma_{см} dl.$$

Подставив $v_{см}$ и $\gamma_{см}$ из (22) и (21) и интегрируя, имеем

$$\Delta p_{см} = A_3 \frac{\gamma_{ж} \cdot \gamma_r}{\gamma_{ж} - \gamma_r} \ln \frac{\gamma_{ж}}{\gamma_{ж} - \frac{\gamma_{ж} - \gamma_r}{\gamma_{ж} \cdot \gamma_r} \cdot \frac{G^2 \lambda_{см}}{2A_3 r g d \omega^2} (l - l_{нач})}. \quad (33)$$

Перепад давления на жидкостном участке (начальном) может быть представлен в виде

$$\Delta p_{ж} = \frac{\lambda_{ж}}{2} \cdot \frac{G^2 l_{нач}}{d\omega^2 g} \gamma_{ж} \quad (34)$$

На рис. 5 представлена графическая форма зависимости $\Delta p = f(l)$ для трубопровода сжиженного газа, имеющего начальный и двухфазный участки.

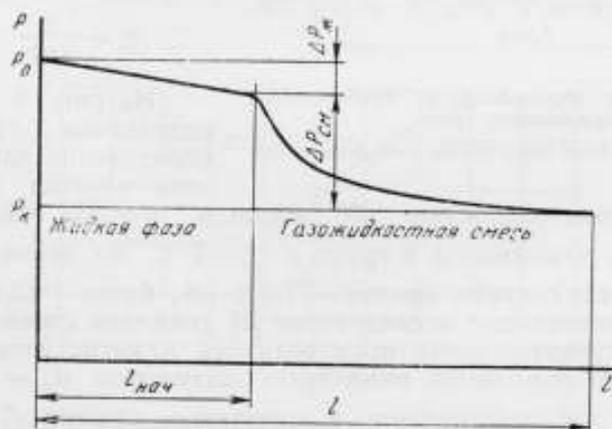


Рис. 5. Гидравлическое сопротивление трубопровода сжиженного газа с фазовыми превращениями.

Работа конечного участка трубопровода сжиженного газа, т. е. участка, в котором наблюдается движение только паровой фазы, ничем не отличается от работы обычного газопровода. Однако при рассмотрении работы трубопровода сжиженного газа этот участок может быть интересен с точки зрения установки расходомерных устройств, ибо по окончании полного испарения сжиженного газа

дальнейшее непрерывное понижение давления потока за счет гидравлических потерь гарантирует работу прибора в условиях, исключающих появление жидкости.

Задача, как и для начального участка, состоит в определении длины газопроводного участка трубопровода сжиженного газа и ее можно рассматривать, в известном смысле, от противного. Предполагая, что по трубопроводу движется газ, определяем длину начального участка, на котором не происходит конденсации углеводородов. Задача решается аналогично.

Исходными в этом случае будут уравнения:

теплопередачи —

$$dQ = K_r (T_{гр} - T) dF, \quad (35)$$

теплообмена —

$$dQ = c_r G dT, \quad (36)$$

сопротивления —

$$dp = \lambda_r \frac{dl}{d} \frac{v_r^2}{2g} \gamma_r, \quad (37)$$

состояния газа —

$$p = Ae^{-\frac{B}{c+T}}, \quad (38)$$

кривой насыщения —

$$\gamma_r = \frac{p}{zRT}. \quad (39)$$

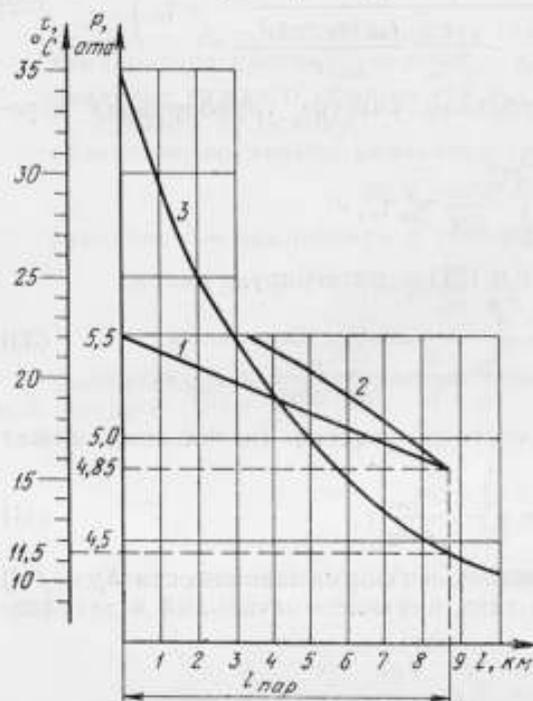


Рис. 6. Участок паровой фазы трубопровода сжиженного газа:

1—по формуле (37); 2—по формуле (38); 3—по формуле (39).

$l_{пар}$, производительностью 450 м³/сутки, $d = 255$ мм, $t_0 = 35^\circ\text{C}$, $p_0 = 5,5$ ата, уложенного в грунт с $t_{гр} = 7^\circ\text{C}$, по которому транспортируется газ состава: пропан — 77,6% об., бутан — 22,4% об.

Экспериментальное исследование [3] движения сжиженных газов с фазовыми превращениями производилось в магистральном трубопроводе углеводородного конденсата диаметром $d_{ин} = 104,1$ мм и длиной 45,3 км, работающем в описанном режиме. Трубопровод производительностью 500 м³/сутки служит для транспортировки сжиженного газа следующего состава (% вес): C_2H_4 — 10; C_2H_6 — 5,3; C_3H_8 — 26,6; C_3H_8 — 2,3; n — C_4H_{10} — 6,0; i — C_4H_{10} — 7,3; $trans$ — C_4H_{10} — 10,5; c,s — C_4H_{10} — 1,6; n — C_4H_{10} — 6,3; i — C_4H_{10} — 0,1; C_5 + высшие — 24,0. Давление насыщения при температуре 25° С составляет 40 атм.

На рис. 7 а, б, в приводятся результаты экспериментального исследования. График 7а представляет зависимость $\Delta p = f(l)$.

На рис. 7б представлен температурный режим газопровода. Как видим (рис. 7а и в), процесс газообразования начинается, когда тем-

пература в трубопроводе не достигает $T \neq T_{гр}$. Это объясняется сложностью состава перекачиваемого газа. Кроме того, в точке *B* температуру в трубопроводе можно считать достаточно стабилизированной, так как падение на участке *BC* (15 км) составляет всего $2,5^\circ\text{C}$. На участке *CD* температура в газопроводе была равной температуре грунта.

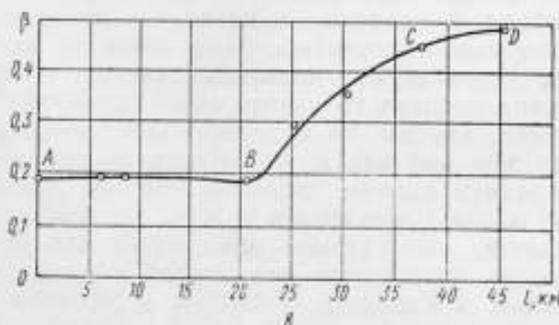
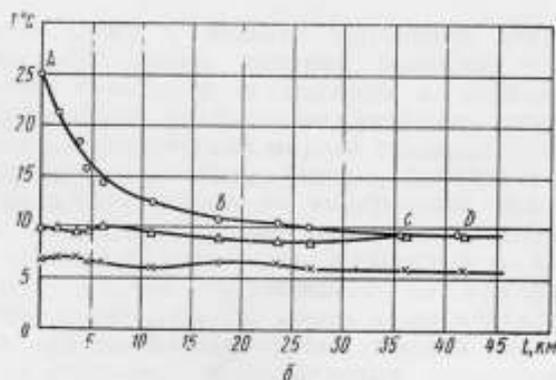
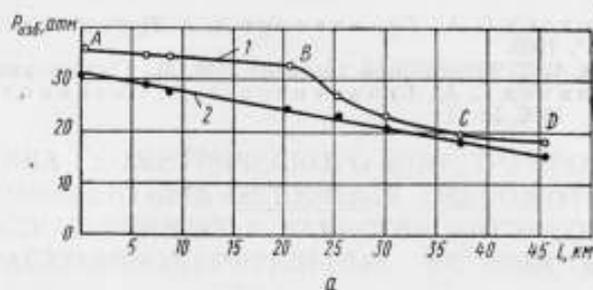


Рис. 7. Результаты исследования работы трубопровода сжиженного газа:

а) зависимость $\Delta p = f(l)$:
 1—для трубопровода сжиженного газа с фазовыми превращениями; 2—для сжиженного газа без фазовых превращений;
 б) температурный режим трубопровода сжиженного газа с фазовыми превращениями: \circ — трубопровод, Δ — грунт, \times — воздух; в) изменение газосодержания в трубопроводе.

На графике 7в представлена зависимость $\beta = f(l)$, построенная по результатам разгонки сжиженного газа, ρ , и T , замеренным в газопроводе. Из графика следует, что на участке *AB* $\beta = 0,19 = \text{const}$,

МЕТОДИКА ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ НИЗКОМОМЕНТНЫХ ОБЪЕМНЫХ ГИДРОМОТОРОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ ДАТЧИКОВ РАСХОДОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

В настоящее время в области измерений расходов веществ существует комплекс задач, который решается с помощью специальных систем автоконтроля расхода и количества потоков. В частности, применение расходоизмерительных устройств способствует созданию математической модели технологического процесса, с помощью которой возможно быстро определять оптимальный режим процесса в зависимости от конкретных условий производства. С другой стороны, большое внимание, уделяемое вопросам автоконтроля расхода и количества жидкостей в технологических линиях различных гидросистем, связано с тем, что такие параметры, как «количество потребляемого сырья и вырабатываемой продукции», являются основными критериями оценки технико-экономических показателей различных промышленных процессов.

Известно, что проблема осуществления автоконтроля расхода и количества потоков сводится в основном к проблеме создания соответствующих датчиков расходоизмерительных устройств.

Предложенные схемы датчиков различного принципа действия [1] с приводом рабочего органа от энергии движущего потока и с электроприводом, в зависимости от метода измерения объемного количества можно разделить на две большие группы. В первую объединяются датчики прямого метода измерения, а во вторую — датчики косвенного метода измерения. Однако рациональность применения того или иного типа конструкции датчика в системах автоконтроля расхода и количества выявляется эксплуатационными требованиями, которые в основном сводятся к достижению высокой точности (не более $\pm 0,5\%$) в широком, более чем десятикратном диапазоне измерений; наименьших потерь давления (не более $0,5 \text{ кгс/см}^2$) при максимальном расходе; независимости показаний расходоизмерительных устройств от параметров контролируемой жидкости; простоты схемы конструкции и эксплуатации, а также высокой надежности.

Расходоизмерительные устройства прямого метода измерения обычно называются счетчиками. Они состоят из низкомоментного объемного гидромотора (что является предметом настоящего исследования) того или иного типа конструкции, используемого в качестве датчика расхода и количества, и механизма счетного указа-

теля, связываемого с рабочим органом гидромотора через жесткий или магнитный вал. Функция расходоизмерительного устройства прямого метода измерения (независимо от типа конструкции датчика) заключается в суммировании рабочего объема I гидромотора, составляемого за полный цикл рабочего органа, путем простого подсчета числа оборотов n рабочего органа механизмом счетного указателя. При этом основная измерительная зависимость его описывается формулой

$$Q = In + \Sigma q, \quad (1)$$

где Q — действительное количество жидкости, протекшее через гидромотор за некоторый промежуток времени τ ;

$\Sigma q = q_y + q_z$ — объемные утечки, наблюдаемые в процессе работы счетчика за тот же промежуток времени τ .

Здесь q_y — условная утечка, обусловливаемая погрешностями в технологии изготовления и расчетов величины рабочего объема I гидромотора, корректируется изменением передаточного отношения в кинематической цепи механизма счетного указателя с помощью блоков сменных шестерен; q_z — протечки жидкости через зазоры между телом подвижного рабочего органа и стенками камеры гидромотора характеризуют точность счетчика.

В условиях производства и эксплуатации принято говорить о кривых относительной погрешности и потери давления для счетчиков, которые являются выражением действительной картины только для одного значения рабочих условий поверки, т. е. некоторого определенного давления, расхода, вязкости, плотности, температуры, зазоров, механических условий в кинематической цепи счетчика и т. п. Очевидно, что исследование этих характеристических зависимостей счетчиков относится к области статического расчета. Оно может быть выполнено графически с помощью кривых зависимости $\delta = \delta(Q)$, относительной погрешности показаний счетчика от расхода и $\Delta p = \Delta p(Q)$ потери давления движущегося потока жидкости от расхода при определенных условиях поверки, которые отражают метрологические и гидравлические показатели счетчика как результат обтекания потоком тела вращающегося рабочего органа и стенок камеры гидромотора.

Известно, что нерегулируемая часть величины объемных утечек — протечек через зазоры q_z — зависит от величины потери давления на гидромоторе счетчика. Потому исследование не должно ограничиваться изучением лишь характера зависимости потери давления на местном сопротивлении гидромотора от расхода и параметров контролируемой жидкости. Оно должно быть направлено на выявление также факторов, обуславливающих эти потери, в целях уяснения динамических условий взаимодействия потока и рабочего органа и исключения нежелательных потерь, играющих роль лишь возмущающих факторов в физической картине исследуемого явления. При этом особенно важны те факторы, которые позволяют уяснить и сформулировать принципы геометрического конструирования с позиций гидравлически невыгоднейших размеров рабочего органа и камеры гидромотора счетчика.

Несмотря на то, что в настоящее время созданы и работают многочисленные типы низкомоментных объемных гидромоторов, используемых в качестве датчиков расхода, вопросы геометрического конструирования последних в зарубежной и отечественной

литературе освещены явно не достаточно и не соответствуют современному уровню и темпам развития устройств автоматических систем контроля и регулирования.

Дело в том, что ввиду обратимости большинства конструкций роторных насосов и моторов, общие вопросы геометрического конструирования и расчетов в литературе рассматриваются применительно к насосам с описанием особенностей использования их в качестве гидромоторов. Этим можно объяснить тот факт, что в молодой отрасли отечественного приборостроения до настоящего времени в инженерной практике преобладают интуитивные приемы проектирования, когда проектировщик широко использует, как правило, готовые схемы, дополняя и изменяя их. В этом случае вид и качество получаемого образца во многом зависят от квалификации проектировщика, его практического опыта и теоретической подготовки.

Не будем здесь пытаться дать исчерпывающий обзор опубликованных в периодической и патентной литературе материалов по расходоизмерительным устройствам, анализ которых на современном уровне произведен в [1—5], а отметим лишь основной принцип геометрического конструирования и ошибки интуитивных приемов современного проектирования объемных гидромоторов как у нас в стране, так и за рубежом. С этой целью в качестве наглядного примера можно выбрать гидромотор овально-шестереночного счетчика (рис. 1). Справедливо считают, что наименьшее гидравлическое сопротивление будет иметь тот гидромотор, живое сечение потокопроводящих каналов которого равно сечению трубопровода. Однако при этом проектировщики ошибочно полагают, что для случая овально-шестереночного гидромотора должно иметь место соотношение вида

$$2Ae \cdot b = \pi r_0^2 \quad (2)$$

со всем многообразием вытекающих отсюда конструктивных соотношений относительно коэффициента $\alpha = \frac{b}{2r_{\max}}$, наблюдаемых в практике ныне действующих нормативов как у нас в стране, так и за рубежом.

Здесь $2Ae = r_{\max} - r_{\min}$, A — большая полуось, а e — эксцентриситет исходного эллипса, r_{\max} и r_{\min} — экстремальные значения радиуса-вектора овальной центроиды, b — высота овальных колес, r_0 — радиус трубопровода в свету.

Как видим из (2), проектировщики полагают, что живое сечение гидромотора и его полезная площадь сечения, участвующая в создании крутящего момента на сопрягаемые овальные колеса

$$M = \frac{\Delta p b}{2} (r_{\max}^2 - r_{\min}^2), \quad (3)$$

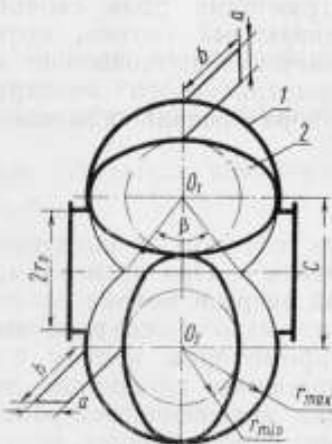


Рис. 1. Схема овально-шестереночного гидромотора:

1 — корпус; 2 — рабочий орган (две взаимобнашиваемые овальные шестерни).

— одно и то же, упустив из вида тот факт, что овално-шестереночный гидромотор является идеальным делителем потока и имеет два одинаковых потокопроводящих канала обтекания прямоугольного профиля.

Действительно, набегающий из трубопровода поток жидкости при входе в камеру гидромотора делится овалными шестернями (играющими роль своеобразных подвижных перегородок) на два одинаковых потока, которые соединяются в один при выходе из камеры в продолжение трубопровода. Потому основной принцип геометрического конструирования овално-шестереночного гидромотора правильно запишется лишь соотношением

$$2Aeb = \frac{\pi r_0^2}{2}, \quad (4)$$

при котором и следует искать оптимальную величину коэффициента α . При всем этом, произведенный анализ в [6] потерь удельной энергии потока на местном сопротивлении гидромотора показал, что в современных конструкциях овално-шестереночных гидромоторов наряду с неизбежными сопротивлениями, обуславливаемыми принципом действия и характером обтекания потоком тела вращающегося рабочего органа, наблюдаются и нежелательные сопротивления, искусственно вносимые ошибками интуитивных приемов проектирования, а именно, сопротивления, обуславливаемые изменениями скорости потока при входе и выходе из камеры гидромотора. Как показали экспериментальные исследования [6], ожидаемое значительное улучшение метрологических и гидравлических показателей работы счетчика подтвердилось при достижении новых соотношений размеров овалных шестерен, определяющих гидравлически невыгоднейшие размеры каналов обтекания прямоугольного поперечного сечения (рис. 1)

$$\begin{aligned} a &= r_{\max} - r_{\min} = \frac{\pi r_0}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2}{\pi}} \right), \\ b &= r_{\max} + r_{\min} = \frac{\pi r_0}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{2}{\pi}} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь

$$r_{\max} = \frac{\pi r_0}{2}, \quad r_{\min} = \frac{\pi r_0}{2} \sqrt{1 - \frac{2}{\pi}}.$$

Низкомоментных объемных гидромоторов, принятых к разработкам и внедрению в отечественное производство согласно типуажу объемно-жидкостных счетчиков [4], с каналами обтекания прямоугольного профиля — четыре типа. Это овално-шестереночные, кольцевые, лопастные и ковшовые. И хотя в зависимости от названных типов конструкций рабочего органа для приведения последнего в движение по-разному используются каналы обтекания, проанализируем примеры геометрического конструирования перечисленных гидромоторов, исходя из условия (5) гидравлически невыгоднейших размеров сечения потокопроводящих каналов обтекания.

Пример 1. Гидромотор, рабочим органом которого являются два одинаковых взаимообкатываемых колеса с овалной центроидой; используются полностью оба канала обтекания (рис. 1).

Уравнение овальной центроиды, получаемой путем преобразования эллиптической центроиды [7], в полярной форме имеет вид

$$r = \frac{\rho}{1 + e \cos 2\psi} = \frac{A(1 - e^2)}{1 + e \cos 2\psi}, \quad (6)$$

где r — радиус-вектор;

ρ — фокальная полуохорда;

A — большая полуось;

e — эксцентриситет исходного эллипса (исходя из условий отсутствия вогнутости овальной центроиды $e = 0,25$);

ψ — угол между полярной осью и радиусом-вектором исходного эллипса.

Экстремальные значения радиуса-вектора овальной центроиды получаем при углах:

$$\begin{aligned} \psi = 90^\circ - r_{\max} &= A(1 + e), \\ \psi = 0^\circ - r_{\min} &= A(1 - e). \end{aligned} \quad (7)$$

Отсюда большая полуось исходного эллипса определяется выражением

$$A = \frac{r_{\max}}{1 + e} = \frac{r_{\min}}{1 - e}. \quad (8)$$

Из построения видно, что гидромотор с овальными колесами получают спариванием двух одинаковых камер, в колодках которых вращаются, взаимообкатываясь, эти колеса. Потому геометрическое конструирование одной из камер позволит построить и гидромотор в целом. Теперь же на основании выражений (5) — (8) можно показать, что геометрические размеры овального колеса (без учета модуля зубьев), определяющие и размеры камеры, выраженные через диаметр условного прохода трубопровода ($d = 2r_0$), запишутся в виде следующих соотношений:

максимальный радиус — $r_{\max} = 0,7854 \cdot d$;

минимальный радиус — $r_{\min} = 0,4712 \cdot d$;

высота овального колеса — $b = 1,2566 \cdot d$;

межцентровое расстояние колес — $C = r_{\max} + r_{\min} = 1,2566 \cdot d$;

угол спаривания двух одинаковых камер гидромотора —

$$\angle \beta = 2 \arccos \frac{b}{2r_{\max}} = 2 \arccos 0,8 = 73^\circ 40';$$

рабочий объем гидромотора V равен учетверенному значению объема серповидной полости, заключенной между внутренним круговым цилиндром камеры и овальным цилиндром колеса, направляющей которого является овальная центроида, $V = 1,8530 d^3$.

Полученные соотношения полностью определяют основные размеры овальных колес и камеры гидромотора. Они должны быть использованы при выборе модуля зубьев, а также в процессе их нарезания.

Пример 2. Гидромотор, рабочим органом которого является кольцевой поршень; используются частично оба канала обтекания при эксцентричном расположении поршня в камере гидромотора (рис. 2).

В исследуемом случае основными конструктивными элементами рабочего органа являются корпус 1, поршень 2 и ограничительный выступ 4, в кольцевом пазу которого движется ось поршня 3; при

этом внутренний круговой цилиндр камеры, поверхность которого обкатывает поршень, является их производной. Здесь задача решается с учетом конструктивных ограничений, связываемых с использованием лишь одной

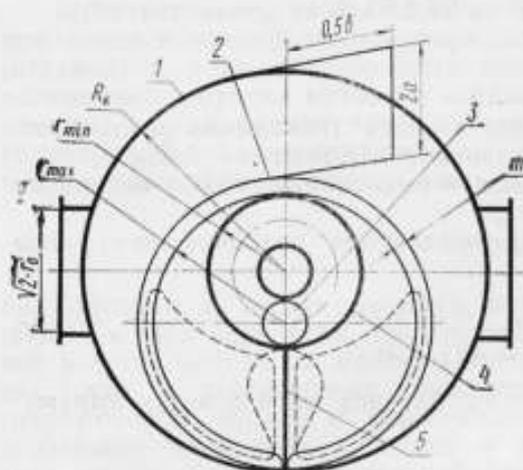


Рис. 2. Схема гидромотора с кольцевым поршнем (пунктиром показаны входное и выходное окна камеры и фигурная прорезь перфорированной поперечной перегородки поршня).

торцевой поверхности камеры под входное и выходное окна, профиль их строится при условии герметизации этих отверстий с помощью перегородки 5 и тела кольцевого поршня. Ограничительные условия, вытекаемые из геометрического построения, записываются как

$$2a \cdot \frac{b}{2} = \frac{\pi d_*^2}{4} = \frac{\pi r_0^2}{2} \quad (9)$$

Используя соотношения (5) и (9), можно показать, что геометрические размеры рабочего органа и камеры гидромотора, выраженные через приведенный диаметр трубопровода ($d_* = \sqrt{2} \cdot r_0$), запишутся в виде соотношений:

внутренний радиус поршня — $r_{\max} = 1,1109 \cdot d_*$;
 наружный радиус ограничительного выступа — $r_{\min} = 0,6665 \cdot d_*$;
 межцентровое расстояние (или эксцентриситет поршня) — $a = 0,4444 d_*$.

Толщину поршня следует искать из условия минимальной разницы объемов двух серповидных полостей камеры (из которых в первом приближении складывается рабочий объем гидромотора), определяющей оптимальный режим работы гидромотора — заполнения и опорожнения камеры с наименьшей пульсацией давления. Геометрическая иллюстрация этого условия записывается соотношением

$$(r_{\max} + m)^2 - (1,5a)^2 = r_{\max}^2 - (0,5a)^2, \quad (10)$$

решением которого, после соответствующих преобразований и подстановок, будет: $m = 0,1650 d_*$.

Внутренний радиус камеры гидромотора — $R_k = r_{\max} + m + a = 1,7203 d_*$;

высота поршня — $0,5 \cdot b = 0,8888 d_*$;

рабочий объем гидромотора равен объему цилиндрического кольца, ограниченного поверхностями камеры и ограничительного выступа, без объемов кольцевого поршня и перегородки, $l = 5,8463 d_*^3$.

Полученные соотношения полностью определяют основные размеры рабочего органа и камеры гидромотора, а также позволяют произвести вычисления координат, определяющих положение фрезы и поршня при выполнении радиальной фигурной прорези на перфорированной поперечной перегородке поршня.

Пример 3. Гидромотор, рабочим органом которого является ротор 2 с прямыми выдвижными лопастями 3; используется лишь один канал обтекания (рис. 3).

Задачу решаем с учетом конструктивных ограничений, связываемых с использованием лишь одного канала обтекания (второй канал обтекания закрыт порогом 5). Запишем их в виде:

$$a \cdot b = \frac{\pi d_*^2}{4} = \frac{\pi r_0^2}{2} \quad (11)$$

Используя соотношения (5) и (11), можно показать, что размеры рабочего органа и камеры гидромотора 1, выраженные через приведенный диаметр трубопровода ($d_* = \sqrt{2} \cdot r_0$), запишутся в виде соотношений:

внутренний радиус камеры, определяемый максимально выдвинутым положением лопастей, — $r_{\max} = 1,1109d_*$;

наружный радиус ротора, определяемый максимально вдвинутым положением лопастей, — $r_{\min} = 0,6665d_*$;

высота ротора — $b = 1,7774d_*$;

рабочий объем гидромотора равен объему, заключенному внутри прямого цилиндрического кольца, образованного внутренней поверхностью камеры и наружной поверхностью ротора, без четырех объемов максимально выдвинутой части лопасти, $V = 4,4092d_*^3 - 3,1586m \cdot d_*^2$ (здесь m — толщина выдвинутой части лопасти).

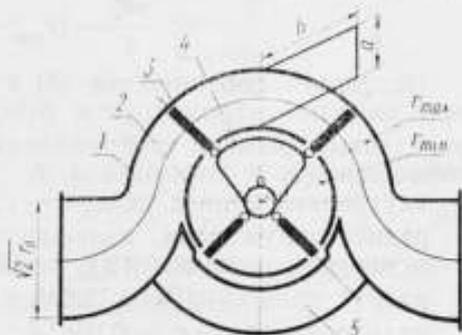


Рис. 3. Схема лопастного гидромотора.

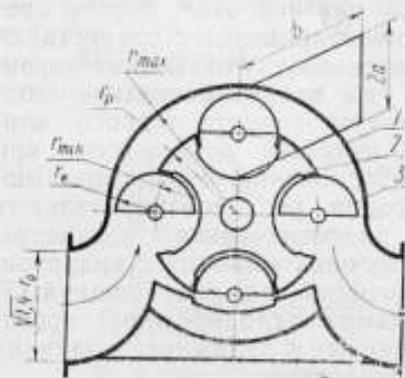


Рис. 4. Схема ковшового гидромотора.

Полученные соотношения полностью определяют основные размеры рабочего органа и камеры гидромотора, они должны быть использованы при расчете кулачкового механизма рабочего органа 4 [8].

Пример 4. Гидромотор, рабочим органом которого является ротор с полуцилиндрическими лопастями (ковшами); используется лишь часть одного канала обтекания (рис. 4).

При решении геометрии этого гидромотора основными расчетными элементами выбираются внутренний радиус камеры r_{\max} и радиус окружности r_{\min} , являющейся геометрическим местом крепления центров ковшей 3 в центре крестообразного ротора 2, размещаемых в корпусе 1. При этом наружный радиус ковша выразится разностью $r_k = r_{\max} - r_{\min}$ и, соблюдая условие герметизации входного и выходного отверстий камеры гидромотора с помощью тела рабочего органа, радиус ротора определяем соотношением

$r_p = \sqrt{r_k^2 + r_{\min}^2}$. Учитывая конструктивные ограничения, связан-

ные с наличием порога f и использованием лишь части одного канала обтекания, площадь сечения которого $S_x = (r_{\max} - r_p) \cdot b$, получаем

$$\frac{\pi d_*^2}{4} = (r_{\max} - r_p) \cdot b. \quad (12)$$

Используя соотношение (5) и (12), можно показать, что размеры камеры гидромотора и рабочего органа, выраженные через приведенный диаметр трубопровода ($d_* = \sqrt{1,4} \cdot r_0$), запишутся в виде соотношений:

внутренний радиус камеры — $r_{\max} = 1,3278d_*$;

радиус окружности, являющейся геометрическим местом крепления центров ковшей, — $r_{\min} = 0,7966d_*$;

радиус ковша — $r_k = 0,5312d_*$;

радиус ротора — $r_p = 0,9581d_*$;

высота ротора — $b = 2,1244d_*$;

рабочий объем гидромотора равен объему, заключенному внутри прямого цилиндрического кольца, образованного внутренней поверхностью камеры и наружной поверхностью тела вращения крестообразного ротора, $l = 5,6402d_*^2$.

Полученные соотношения полностью определяют основные размеры рабочего органа и камеры гидромотора.

Известно, что прежде чем приступить к решению конструктивных особенностей гидромотора расходоизмерительного устройства, связанных со специфичностью физико-химических свойств рабочей жидкости и с требованиями рабочих условий учета, инженер-конструктор обычно должен уяснить себе ряд показателей широкого круга начальных условий проектирования, обуславливаемых геометрическими (а следовательно, и гидравлическими) параметрами разрабатываемого типоразмера. Если до сих пор этот барьер преодолевался интуитивными приемами проектирования с сопутствующими им неизбежными ошибками, значительно ухудшающими характеристические зависимости счетчика, то экспериментально подтвержденные [6] утверждения и примеры геометрического конструирования рекомендуются нами в качестве руководства при проектировании нормального (научно обоснованного) ряда промышленных образцов объемных гидромоторов расходоизмерительных устройств. Их метрологические и гидравлические параметры должны быть выше уровня требований лучших мировых стандартов, так как на базе гидравлически наивыгоднейших соотношений (5) однозначно освещают показатели начальных условий проектирования, во многом определяющих совершенство и надежность датчика создаваемого расходоизмерительного устройства.

ЛИТЕРАТУРА

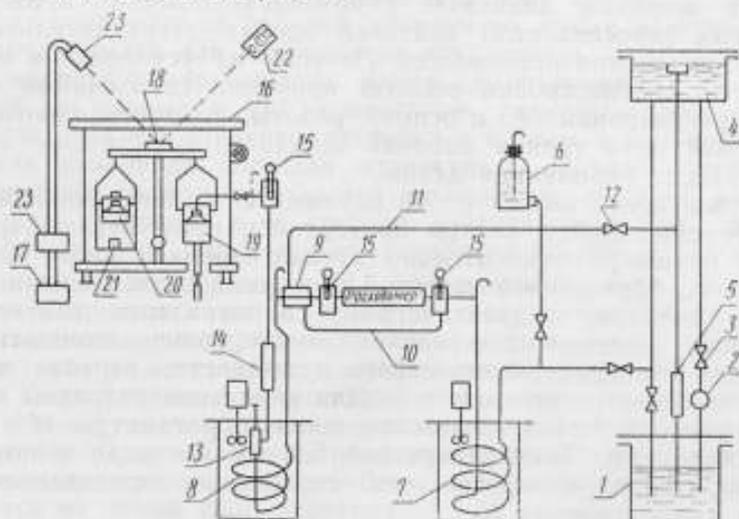
1. Катус Г. П. Система автоматического контроля полей скоростей и расходов. М., «Наука», 1965.
2. Кремлевский П. П. Расходомеры. М.—Л., Машгиз, 1963.
3. Павловский А. Н. Измерение расхода количества жидкостей, газов и паров. М., Машгиз, 1951.
4. Мануков Э. С. Типаж объемно-жидкостных счетчиков. Баку, Центральное бюро технической информации, 1962.
5. Мануков Э. С. «Приборы и средства автоматизации», 1962, № 9.
6. Мануков Э. С., Абдурашитов С. А. «Нефть и газ», 1968, № 9.
7. Литвин Ф. Л. Некруглые зубчатые колеса. М., Машгиз, 1956.
8. Таратуга Р. Н. и др. Лопастные счетчики. «Машиностроение», 1968, № 3.

УСТАНОВКА ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ МИКРОРАСХОДОМЕРОВ ЖИДКОСТИ И ЕЕ АТТЕСТАЦИЯ

В связи с большим объемом научно-исследовательских работ в области химических и нефтехимических производств резко возросло количество эксплуатируемых и проектируемых опытных установок.

Узким местом при автоматизации опытных установок являются расходомеры на малые и микрорасходы различных веществ. Острая необходимость и практическое отсутствие в промышленных каталогах заставили различные организации разрабатывать и изготавливать микрорасходомеры для удовлетворения собственных потребностей [1, 2]. Созданные микрорасходомеры отличаются как по принципу действия, так и по своим техническим и метрологическим показателям.

В Иркутском НИИХиммаше разработана, построена и совместно с Иркутским филиалом ВНИИФТРИ исследована установка для градуировки микрорасходомеров жидкости в диапазоне массовых расходов от 2,5 до $2,5 \cdot 10^3$ мг/сек (0,009 - 9 кг/ч). Иркутским филиалом ВНИИФТРИ проведены работы по ее аттестации. Схема установки приведена на рис. 1.



Фиг. 1. Установка для градуировки микрорасходомеров жидкости.

Установка состоит из расходного и испытательного участков, устройства для настройки расхода и измерительного устройства. Расходный участок выполнен по известной схеме [3] и включает сливной бак 1, насос 2, вентиль настройки режима перелива 3, напорный бак с переливным устройством 4. Для контроля режима перелива в сливной трубе имеется стеклянная вставка 5. С целью обеспечения возможности работы установки в широком диапазоне расходов ($G_{\max}/G_{\min} > 10^3$) и, в особенности, для обеспечения работы на малых расходах — меньших $2,5 \cdot 10^2$ мг/сек (0,9 кг/ч), расходный участок дополнен сосудом Мариотта 6, высота расположения которого может изменяться.

Испытательный участок, предназначенный для установки поверяемого или исследуемого расходомера, имеет ряд особенностей, обусловленных спецификой установки.

Для изучения температурных погрешностей расходомеров на испытательном участке используют входной — 7 и выходной — 8 теплообменники. Назначение последнего — довести температуру жидкости до нормальной перед подачей ее на измерительное устройство. Чтобы исключить влияние выходного теплообменника на исследуемый расходомер, между ними установлен компенсационный теплообменник 9.

При работе с весьма малыми расходами трудно удержать стабильную температуру жидкости на входе в расходомер, а процесс изменения заданной величины температуры был бы весьма длителен. Чтобы устранить эти явления, на испытательном участке организован дополнительный контур циркуляции рабочей жидкости. Непосредственно перед входом в расходомер поток жидкости, прошедший через теплообменник 7, делится на две части.

Основной поток заданного расхода проходит через расходомер и далее на измерительное устройство. Вспомогательный поток по трубке 10 отводится как теплоноситель в компенсационный теплообменник 9 и оттуда по трубке 11 сбрасывается в сливной бак. Расход вспомогательного потока настраивают вентилем 12.

Плавная настройка расходомеров малых и микрорасходов жидкостей в широком диапазоне с помощью обычно применяемых игльчатых (дроссельных) вентилях весьма затруднительна, а зачастую совершенно невозможна. Поэтому на установке в качестве устройства для настройки расхода применен специальный вентиль плавной регулировки 13, в основу работы которого положены законы вязкостного трения рабочей жидкости при течении в капиллярном канале переменной длины.

Вентиль представляет собой плунжер с трапецеидальной нарезкой, перемещающийся внутри притертой к нему втулки [4]. Перемещение плунжера относительно втулки изменяет длину капиллярного канала, образуемого нарезкой и втулкой, и тем самым плавно изменяет величину гидравлического сопротивления вентили. Так как перепад давления на капилляре может сильно изменяться при колебаниях температуры его стенок и жидкости, вентиль помещен в ванну выходного термостата 8. Для индикации величины настраиваемого расхода использованы стеклянные ротаметры 14 и тепловые расходомеры. Температура рабочей жидкости до и после расходомера и перед измерительным устройством определяется термометрами сопротивления 15.

Измерительное устройство построено на базе аналитических весов 16 типа АДВ-200 и электронного частотомера 17 с цифровым

отсчетом типа Ф-551. На коромысле весов укреплено зеркальце 18, на правую серьгу коромысла навешена рабочая кювета 19, а на левую — компенсационная кювета 20 и чашка 21 для наложения тарного груза и груза предварительного налива. На правую серьгу механизмом гиреналожения весов могут быть навешаны наборы рабочих грузов. Луч света от осветителя 22 в момент, когда положение коромысла близко к равновесному, зеркальцем 18 направляется на фотореле 23; последнее управляет работой электронного секундомера 17.

Рабочая кювета (рис. 2) представляет собой цилиндрический сосуд 1 с коническим дном и крышкой 2. В дне кюветы расположен сливной патрубок с краном 3, а в крышке — отверстие для пропуска в кювету наконечника 4 наливного патрубка 5. В верхней части кюветы установлен переливной стакан 6 на коническом основании. Такая конструкция рабочей кюветы позволяет исключить ряд трудностей, обусловленных малой величиной измеряемых расходов.

Путем подачи жидкости из наконечника на уровень перелива в переливном стакане исключается каплеобразование, наблюдаемое при свободном истечении жидкости из наконечника. Так, при диаметре наконечника 2 мм вода начинает вытекать каплями при расходе 250 мг/сек (0,9 кг/ч) и менее.

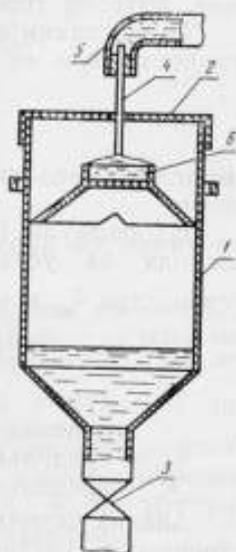
Поступление жидкости из наливного патрубка на поверхность постоянного уровня в переливном стакане обеспечивает неизменность величины общего перепада давления рабочей жидкости на установке и не изменяет в процессе измерения величину настроенного расхода.

Наличие крышки с отверстием для пропуска наконечника наливного патрубка резко уменьшает величину потерь рабочей жидкости от испарения из рабочей кюветы во время измерения и создает предпосылки для компенсации этих потерь.

Компенсационная кювета имеет конструкцию, аналогичную рабочей, и равные с ней поперечные размеры. Она отличается лишь отсутствием сливного патрубка с краном и наличием устройства для изменения площади отверстия в верхней крышке. Компенсационная кювета заполняется до половины рабочей жидкостью, а площадь отверстия в ее крышке настраивается так, чтобы разность потерь веса жидкости от испарения из рабочей и компенсационной кювет не превышала $2,8 \cdot 10^{-1}$ мг/сек (1 мг/ч).

При открытом сливном кране 3 настроенный установившийся поток жидкости непрерывно проходит через рабочую кювету. На правую серьгу навешивают тарированные грузы, масса которых должна быть замещена в процессе измерения массой рабочей жидкости. На левую чашку весов устанавливают груз предварительного налива. Сливной кран 3 закрывают, и рабочая кювета начинает заполняться жидкостью. Весы разарретируются, коромысло опирается на левый упор арретира.

В момент наступления положения первого равновесия луч света от зеркальца 18 попадает на фотореле 23, последнее вклю-



Фиг. 2. Измерительная кювета.

чает секундомер 17. Затем с правой серьги снимают тарированные грузы, и коромысло весов вновь опирается на левый упор арретира.

Когда масса жидкости, набранной в рабочую кювету с момента начала счета времени, будет равна массе снятых грузов, наступает второе положение равновесия. Луч света вновь попадает на фотореле, которое теперь останавливает счет времени на секундомере.

Точно таким образом измеряют время набора τ заданной массы жидкости m и по формуле

$$G = \frac{m}{\tau} \quad (1)$$

вычисляют величину среднего массового расхода за время измерения.

Из формулы (1) следует, что погрешность измерения среднего расхода на установке $\delta_{G \text{ ср}}$ равна погрешности измерительного устройства $\delta_{\text{из}}$ и определяется следующим выражением:

$$\delta_{G \text{ ср}} = \delta_{\text{из}} = \Sigma \theta_i \pm \sqrt{\Sigma \delta_{mi}^2 + \Sigma \delta_{\tau i}^2}, \quad (2)$$

где $\Sigma \theta_i$ — сумма систематических погрешностей, не учтенных в поправках;

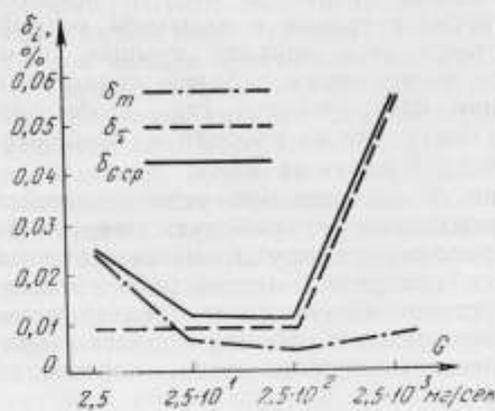
δ_{mi} — предельная i -я частная погрешность измерения массы;

$\delta_{\tau i}$ — предельная i -я частная погрешность измерения времени.

Анализ источников погрешностей показал, что наиболее существенными частными погрешностями, определяющими точность результата измерения, являются: погрешность весов (чувствительность и непостоянство показаний); вариация погрешности от действия аэростатических сил [5], а также погрешности: некомпенсации испарения, от неравенства расходов в моменты первого и второго уравнивания, генератора электронного секундомера, системы запуска и остановки счета времени.

Максимальные значения величин указанных погрешностей определялись на воде при нормальной температуре экспериментально и оценивались аналитически.

Результаты определения погрешности измерения среднего расхода $\delta_{G \text{ ср}}$, а также суммарные значения погрешностей определения массы $\delta_m = \sqrt{\Sigma \delta_{mi}^2}$ и времени $\delta_{\tau} = \sqrt{\Sigma \delta_{\tau i}^2}$ приведены на рис. 3.



Фиг. 3. График погрешностей.

Так как систематические погрешности в данном случае известны по величине и знаку, на них вводится поправка. В этом случае $\Sigma \theta_i = 0$.

В диапазоне расходов от $2,5 \cdot 10^0$ до $2,5 \cdot 10^3$ мг/сек суммарная ошибка измерения среднего расхода $\delta_{G \text{ ср}}$ не превышает 0,011%. Увеличение суммарной ошибки $\delta_{G \text{ ср}}$ до 0,055% при увеличении расхода от $2,5 \cdot 10^0$ до $2,5 \cdot 10^3$ мг/сек вызвано уменьшением времени измерения при неизменной массе взвешиваемой жидко-

сти. При изменении расхода от $2,5 \cdot 10$ до $2,5$ мг/сек суммарная ошибка $\delta_{G\text{ ср}}$ увеличивается до 0,025% вследствие уменьшения взвешиваемой массы жидкости при неизменном времени измерения.

При определении значения величины мгновенного расхода по измеренному среднему значению очень большую роль играет стабильность потока на установке.

В этом случае ошибка определяется по формуле

$$\delta_{G_{\text{м}}} = \sqrt{\Sigma \delta_{m_i}^2 + \Sigma \delta_{v_i}^2 + \delta_g^2} \quad (3)$$

или

$$\delta_{G_{\text{м}}} = \sqrt{\delta_{G\text{ ср}}^2 + \delta_g^2}, \quad (3')$$

где δ_g — относительная величина колебаний расхода во время измерения.

Примечание. Формула (3') справедлива в том случае, если значение $\delta_{G\text{ ср}}$ определено с учетом максимально возможной нестабильности расхода на установке; $\delta_g = \delta_{g\text{ max}} = \text{const}$. В противном случае верна только формула (3), так как $\delta_{G\text{ ср}} = f(\delta_g)$.

В случае измерения среднего или определения мгновенного расхода жидкости при изменении температуры во время измерения, могут вноситься дополнительные погрешности b_t и δ_t , которые должны суммироваться с остальными по общим правилам.

Выводы

1. Разработанная и построенная установка имеет высокие метрологические показатели измерительного устройства и обеспечивает измерение средних массовых расходов и количеств воды с точностью в диапазоне расходов соответственно:

$2,5 \div 2,5 \cdot 10$ мг/сек — 0,025% и 0,024%.

$2,5 \cdot 10 \div 2,5 \cdot 10^2$ мг/сек — 0,011% и 0,006%.

$2,5 \cdot 10^2 \div 2,5 \cdot 10^3$ мг/сек — 0,055% и 0,10%.

Это уже сейчас позволяет поверять на ней расходомеры с интегральным выходом и линейной характеристикой с погрешностью не ниже 0,16%, а счетчики — с погрешностью порядка 0,1%.

2. Высокая точность измерения малых расходов на установке получена за счет применения схемы и метода измерения, основными характерными элементами которых являются:

а) капельный контакт наконечника наливного патрубка с уровнем жидкости в переливе рабочей кюветы, обеспечивающий непрерывное равномерное поступление жидкости в рабочую кювету при сохранении порядка величины чувствительности аналитических весов;

б) конструкция рабочей кюветы и наличие компенсационной кюветы, исключающие практически погрешности от испарения рабочей жидкости из рабочей кюветы;

в) определение массы жидкости путем двукратного динамического взвешивания на одном плече весов по методу замещения при обеспечении идентичности условий первого и второго взвешиваний, исключающее ряд погрешностей измерения массы, такие, как неравноплечность весов, погрешности взаимодействия наливного патрубка и выходящей струи жидкости с рабочей кюветой;

г) автоматическая бесконтактная индикация равновесного состояния весов для запуска и остановки измерителя времени;

д) использование капиллярного вентиля для плавной настройки величины расхода.

3. Герметизация установки, в частности измерительного устройства, легко осуществима, что является важнейшей предпосылкой для применения данной установки для поверки измерителей расхода и количества взрывоопасных, летучих, агрессивных и токсичных сред.

4. Реально создание аналогичных установок для работы в диапазоне расходов до $2,5 \cdot 10^4 + 2,5 \cdot 10^5$ мг/сек (90 + 900 кг/ч).

5. Достигнутые фактически на данной установке точности измерения расходов для разработанного метода измерения не являются предельными и могут быть значительно повышены.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кремлевский П. П. Расходомеры. М.—Л., Машгиз, 1963.
2. Бошняк Л. Л., Бызов Л. Н. Измерение малых расходов жидкостей. М.—Л., Машгиз, 1961.
3. Павловский А. Н. Измерение расхода и количества жидкостей, пара и газа. М., изд-во стандартов, 1967.
4. Башта Т. М. Машиностроительная гидравлика. М., Машгиз, 1963.
5. Смирнова Н. А. „Измерительная техника“, 1968, № 1.
6. Рабинович Б. Е. Исследования по методике оценки погрешностей измерений. Сб. Трудов институтов Комитета стандартов, мер и измерительные приборов. Вып. 57 (117). М.—Л., Стандартгиз, 1962.

ОБРАЗЦОВАЯ ГАЗОМЕРНАЯ УСТАНОВКА С ФОТОЭЛЕКТРОННЫМ ПОВТОРЕНИЕМ ПОКАЗАНИЙ

Разработана авторами и совместно с Управлением „Брянскгаз“ построена автоматическая быстродействующая образцовая газомерная установка объемного типа на расходы до $3500 \text{ м}^3/\text{ч}$ с колокольным мерником емкостью 10 м^3 и фотоэлектронным устройством (повторителем) для съема отчета показаний поверяемого прибора и мерника „на ходу“. В основу установки положен разработанный нами ранее [2, 3] метод поверки предварительно разогнанного прибора путем кратковременного пропуски через него без нарушения установившегося режима работы контрольного объема мерника с автоматическим съемом отчета „на ходу“.

В настоящее время сравнительно большие расходы в образцовых газомерных установках (до $1500 \text{ м}^3/\text{ч}$) при достаточно высокой точности измерения (предельная погрешность $0,35\%$) достигнуты лишь в Ленинграде и Ивано-Франковске, где созданы образцовые газомерные установки на базе колокольных мерников емкостью 5 м^3 .

Упомянутый метод в данной разработке позволил достичь максимального расхода $3500 \text{ м}^3/\text{ч}$, что более чем в два раза превышает верхний предел измерения ныне действующих установок. В установке по-новому решены вопросы автоматического съема отчета показаний поверяемого прибора и мерника „на ходу“, улучшен переходный процесс при отключении воздуходувки, повышена точность мерника.

Рассмотрим работу установки (рис. 1). В исходном перед началом поверки положении поверяемый прибор 1 (например, ротационный газосчетчик) с фотоэлектронным повторителем показаний уста-

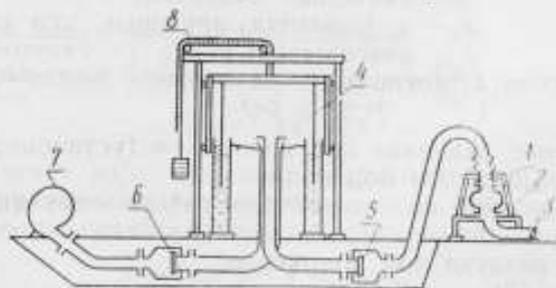


Рис. 1. Принципиальная схема газомерной быстродействующей установки с фотоэлектронным повторителем.

новлен на стенде 2, а градуированная заслонка 3 выставлена в положении требуемого расхода. Колокол 4 опущен, клапаны 5 и 6 закрыты.

Поверочный цикл начинается пуском воздуходувки 7 и открытием клапана 6, в результате чего наряду с донаполнением мерника производится разгон поверяемого прибора. Когда прибор достигает установившегося режима работы, а колокол поднимается в верхнее крайнее положение, закрывается клапан 6, отключающий воздуходувку. С этого момента через поверяемый прибор газ подается только из мерника. Процесс отключения воздуходувки и перехода установки на работу от мерника будем называть переходным процессом. В начале через прибор проходит неградуированная часть объема, а далее контрольный объем V_k , во время прохождения которого с поверяемого прибора снимается отсчет показаний.

Исследование переходного процесса установки

Учитывая кратковременность поверки, переходный процесс установки должен обеспечивать минимальное нарушение установившегося режима работы поверяемого прибора.

Рассмотрим характер движения колокола во время этого процесса, для чего составим дифференциальное уравнение колокола. При определенных допущениях воздух под колоколом и в трубопроводе, если считать его как упругую подушку, можно условно заменить эквивалентной пружиной, на верхний конец которой опирается колокол. Учитывая, что кроме закрытия клапана 5, оказывающего возмущающее воздействие на колокол при поверке ротационных счетчиков количества газа, действует еще и возмущение, вследствие кратковременного разрежения перед прибором, обусловленное его работой в этот период в насосном режиме, другой конец пружины в эквивалентной схеме будем рассматривать также подвижным (рис. 2).

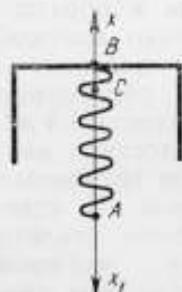


Рис. 2. Эквивалентная схема для исследования переходного процесса мерника.

В этом случае дифференциальное уравнение движения колокола можно записать:

$$m\ddot{x} + c_1\dot{x} + cx = -cx_1, \quad (1)$$

где m — приведенная масса колокола;

c_1 — коэффициент пропорциональности демпфирующих сил;

c — жесткость упругой воздушной подушки;

x — смещение колокола;

x_1 — деформация пружины, что соответствует разрежению перед счетчиком.

Для нахождения x_1 воспользуемся законом Бойля—Мариотта:

$$P_0V_0 = PV, \quad (2)$$

где P_0 — начальное давление под колоколом (установившееся);

V_0 — начальный объем под колоколом;

P — давление под колоколом при работе счетчика в насосном режиме;

V — объем воздуха под колоколом.

Из уравнения (2)

$$P = \frac{P_0V_0}{V} = \frac{P_0V_0}{V_0 + V_c}, \quad (3)$$

где V_0 — объем воздуха, прошедшего через счетчик за время переходного процесса.

$$V_0 = Q_0 \cdot \tau. \quad (4)$$

Здесь Q_0 — мгновенный расход, $m^3/ч$;

τ — время переходного процесса мерника.

Так как мгновенный расход счетчика газа пропорционален угловой скорости вращения роторов, то в соответствии с [4] имеем

$$Q_0 = K_1 \omega = K_1 K \Delta P (1 - e^{-\frac{t}{T}}), \quad (5)$$

где K_1 — коэффициент пропорциональности расхода;

K — передаточный коэффициент;

ΔP — перепад давления;

T — постоянная времени;

t — текущее время.

Подставляя последовательно (4) и (5) в уравнение (3) и имея в виду, что $P = \Delta P + P_b$ (здесь P_b — давление за поверяемым прибором), определим ΔP :

$$\Delta P = \frac{P_0 V_0}{V_0 + K_1 K \Delta P \cdot \tau (1 - e^{-\frac{t}{T}})} - P_b. \quad (6)$$

Полагая $K \Delta P = \omega_{уст}$ [4],

где $\omega_{уст}$ — установившаяся угловая скорость вращения роторов счетчика,

и имея в виду равенство

$$\Delta P = K_2 x_1,$$

где K_2 — коэффициент пропорциональности,

определим из уравнения (6) x_1 :

$$x_1 = \frac{P_0 V_0}{K_2 (V_0 + K_1 \omega_{уст} \tau) (1 - e^{-\frac{t}{T}})} - \frac{P_b}{K_2}. \quad (7)$$

Обозначая

$$E = \frac{P_0 V_0}{K_2 (V_0 + K_1 \omega_{уст} \tau)},$$

уравнение (7) запишется:

$$x_1 = \frac{E}{1 - e^{-\frac{t}{T}}} - \frac{P_b}{K_2}. \quad (8)$$

Подставив выражение (8) в (1), имеем

$$m \ddot{x} + c_1 \dot{x} + c x = -c \left(\frac{E}{1 - e^{-\frac{t}{T}}} - \frac{P_b}{K_2} \right). \quad (9)$$

Для получения характеристики переходного процесса мерника преобразуем уравнение (1) и примем $x_1 = 1$, что соответствует введению единичного скачкообразного возмущения:

$$\ddot{x} + 2n \dot{x} + v^2 x = -v^2, \quad (10)$$

где

$$2n = \frac{c_1}{m}, \quad v^2 = \frac{c}{m}.$$

Характеристическое выражение однородного уравнения (10) будет:

$$z^2 + 2nz + v^2 = 0, \quad (11)$$

$$z_{1,2} = -n \pm \sqrt{n^2 - v^2}.$$

Характер переходного процесса мерника определяется корнями характеристического уравнения (11).

При $n < v$ корни сопряженные комплексные

$$z_{1,2} = -n \pm \sqrt{v^2 - n^2}i.$$

Тогда общее решение (10) будет:

$$x_{cn} = e^{-nt} (A \cos \sqrt{v^2 - n^2}t + B \sin \sqrt{v^2 - n^2}t). \quad (12)$$

Частным решением уравнения (10) является $x_r = -1$, а общим

$$x = x_{cn} + x_r = e^{-nt} (A \cos \sqrt{v^2 - n^2}t + B \sin \sqrt{v^2 - n^2}t) - 1. \quad (13)$$

Задавшись начальными условиями

$$x|_{t=0} = 0, \quad \dot{x}|_{t=0} = \dot{x}_{уст},$$

где $\dot{x}_{уст}$ — установившаяся скорость колокола, найдем A и B :

$$A = 1, \quad B = \frac{\dot{x}_{уст} + n}{\sqrt{v^2 - n^2}}.$$

Таким образом, уравнение переходного процесса мерника в случае поверки ротационных газосчетчиков имеет вид

$$x = e^{-nt} \left(\cos \sqrt{v^2 - n^2}t + \frac{\dot{x}_{уст} + n}{\sqrt{v^2 - n^2}} \sin \sqrt{v^2 - n^2}t \right) - 1 \quad (14)$$

или

$$x = ae^{-nt} \sin \sqrt{v^2 - n^2}t + \beta - 1.$$

Как видим из (14), в результате двойного возмущения после отключения воздуходувки колокол приходит в колебательное движение. Это неблагоприятный переходный процесс, ухудшающий точность газомерной установки.

Если $n > v$, то корни уравнения (11) вещественные и разные:

$$z_{1,2} = -n \pm \sqrt{n^2 - v^2}.$$

Общее решение уравнения (10) будет иметь вид

$$x = A_1 e^{z_1 t} + B_1 e^{z_2 t} - 1. \quad (15)$$

Из начальных условий $x|_{t=0} = 0$, $\dot{x}|_{t=0} = \dot{x}_{уст}$ находим A_1 и B_1 :

$$A_1 = \frac{\sqrt{n^2 - v^2} + \dot{x}_{уст} + n}{2\sqrt{n^2 - v^2}}, \quad B_1 = -\frac{\dot{x}_{уст} + n - \sqrt{n^2 - v^2}}{2\sqrt{n^2 - v^2}}. \quad (16)$$

Уравнение кривой переходного процесса мерника получим, подставив выражение (16) в (15):

$$x = \frac{\sqrt{n^2 - v^2} + \dot{x}_{уст} + n}{2\sqrt{n^2 - v^2}} e^{(-n + \sqrt{n^2 - v^2})t} - \frac{\dot{x}_{уст} + n - \sqrt{n^2 - v^2}}{2\sqrt{n^2 - v^2}} e^{-(n + \sqrt{n^2 - v^2})t} - 1. \quad (17)$$

Кривые переходного процесса мерника в первом и втором случаях изображены на рис. 3. Как видно из рис. 3, переходный процесс мерника при $n > \gamma$ более благоприятный. Улучшение его в разработанной установке достигнуто путем введения на верхнем участке движения колокола демпфирования (введение демпфирования на рабочем участке мерника нежелательно из-за понижения чувствительности мерника).

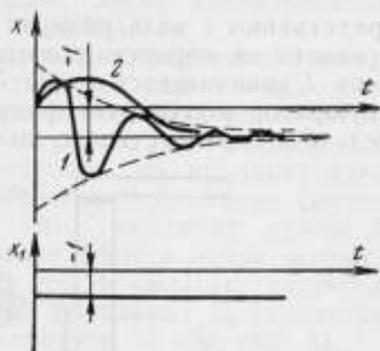


Рис. 3. Кривые переходных процессов мерника.

Особенности конструкции мерника емкостью 10 м^3

В отличие от применяемых в настоящее время колокольных мерников, разработанный мерник имеет неподвижную шкалу (вместо подвижной линейки) и подвижный указатель, что улучшает условия отсчета. Для осуществления автоматического отсчета показаний поверяемого прибора в случае проверки расходомеров с приемными преобразователями в виде вращающихся роторов разработан фотоэлектронный повторитель показаний, работающий совместно с фотоэлектрической двухпредельной линейкой (рис. 4).

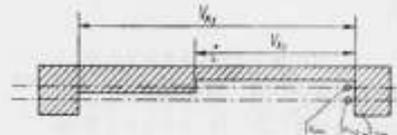


Рис. 4. Схема фотоэлектрической линейки.

Линейка 1 выполнена из листового светонепроницаемого материала (алюминий, текстолит и т. д.) с двумя пределами измерения — $V_{k1} = 5 \text{ м}^3$ и $V_{k2} = 10 \text{ м}^3$. Она устанавливается на мернике неподвижно рядом со шкалой таким образом, что находится между двумя парами 2 и 3 осветителей и фотозащитных элементов. В зависимости от установленного предела измерения работает та или иная пара (на пределе V_{k1} — пара 3 и на пределе V_{k2} — пара 2).

Направление колокола — принудительное с наружными направляющими. Компенсация „потери“ веса — весовая с помощью утяжеленной стальными стержнями прорезиненной ленты 8 (см. рис. 1).

Отношение диаметра к высоте колокола принято близким к единице.

Фотоэлектронный повторитель показаний

Фотоэлектронный повторитель показаний поверяемых приборов состоит из тахометрического датчика импульсов (рис. 5), электронно-счетного блока (рис. 6) и пересчетного устройства ПС-100 или ПП-12. Фотоэлектронный повторитель может применяться для съема отсчета показаний „на ходу“ расходомеров и счетчиков количества, в которых приемным преобразователем является вращающийся пропорционально расходу ротор (тахометрические расходомеры, ротационные счетчики количества газа и др.). Тахометрический генератор импульсов (см. рис. 5), предназначенный для проверки ротационных газовых счетчиков, рассчитан на съем отсчета показаний непо-

средственно с вала ротора. Тахометрический генератор импульсов 4 крепится на корпусе ротационного счетчика 2. В вал ротора счетчика 1 ввинчивается валик 7 с обтюратором 5. При вращении ротора обтюратор модулирует фокусированный световой поток от осветителя 6 в соответствии с количеством прорезей.

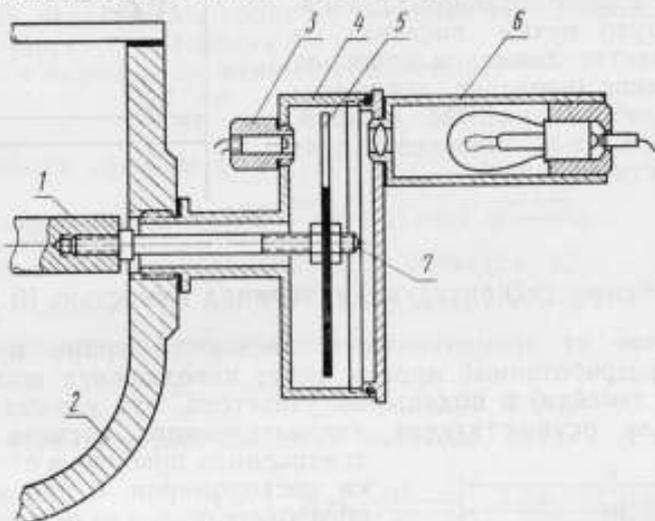


Рис. 5. Конструктивная схема тахометрического датчика импульсов.

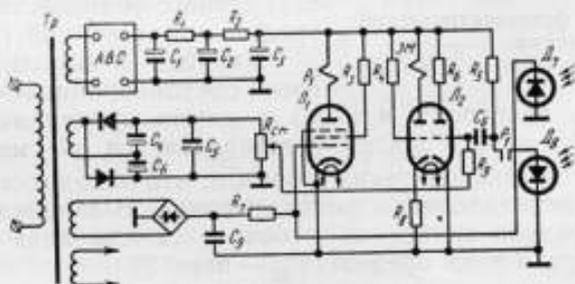


Рис. 6. Принципиальная схема электронно-счетного блока.

Фотоэлемент 3 преобразует модулированный световой поток в соответствующие электрические сигналы. Количество прорезей обтюратора выбирается таким, чтобы сосчитанное количество импульсов можно было легко привести к единицам объема или расхода путем деления на постоянный коэффициент. Конструкция преобразователя позволяет осуществить быструю установку его на поверяемом приборе без нарушения герметичности последнего. После поверки в резьбовое отверстие ввинчивается заглушка.

Электронно-счетный блок (ЭСБ) (см. рис. 6) состоит из блока питания, формирующего блока со схемой запуска и остановки, а также электромеханического счетчика импульсов. Блок питания включает в себя силовой трансформатор T_r , схему выпрямления и стабилизации анодного напряжения и напряжения смещения.

Формирующий блок собран по схеме ждущего мультивибратора на двойном триоде типа 6Н2П (лампа L_2), что позволяет получить

на выходе импульсы прямоугольной формы, легко сосчитываемые электромеханическим счетчиком типа СБ-1М-100.

Схема запуска и остановки счета импульсов обеспечивает начало отсчета в момент засвечивания фотодиода D_7 (на рис. 4 — одного из фотоэлементов пары 2 или 3) и прекращение отсчета, когда через поверяемый прибор будет пропущен объем V_k и фотодиод D_7 (см. рис. 6) опять затемнится. Схема построена по принципу электронного реле и работает следующим образом. В исходном состоянии фотодиод D_7 затемнен, вследствие чего на сетку лампы L_1 подается значительное отрицательное напряжение, и лампа закрыта. Поляризованное реле P_1 обесточено, а его нормально открытые контакты поддерживают разомкнутой цепь фотодиода D_8 тахометрического генератора импульсов — фотоэлемента 3 (см. рис. 5).

Когда между одной из пар 2 или 3 „осветитель—фотоэлемент“ (см. рис. 4) находится участок линейки V_k , фотодиод D_7 (см. рис. 6) засвечивается, его сопротивление резко падает, и лампа L_1 открывается. Реле P_1 , срабатывая, подключает фотодиод D_8 тахогенератора импульсов к формирующему блоку. На выходе формирующего блока включен электромеханический счетчик ЭМ, а также дублирующее его показание с целью повышения точности поверки пересчетное устройство типа ПС-100 или ПП-12.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кремлевский П. П., Гонек Н., Педан М. С. „Измерительная техника“, 1965, № 4.
2. Бродин И. С. „Измерительная техника“, 1962, № 5.
3. Бродин И. С. Разработка и исследование некоторых схем образцовых установок измерения количества и расхода газа. Труды I научно-технической конференции по расходомерии. М., 1965.
4. Бродин И. С. Кандидатская диссертация. Ивано-Франковск, 1965.

ТАРИРОВОЧНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ РАСХОДОВ ГАЗА

Промышленному осуществлению любого нового процесса нефтепереработки и нефтехимии в настоящее время обычно предшествует стадия его исследования на пилотных установках. Качество информации, полученной на этой стадии разработки, во многом определяет успешное внедрение процесса в промышленность. Важная роль для сбора достоверных данных отводится совершенствованию средств контроля различных технологических параметров. К ним относится, в частности, измерение расхода газовых потоков.

Известно, что наиболее распространенный метод измерения расхода газа — метод, основанный на измерении расхода по перепаду давления. Он достаточно точен, удобен и универсален, а во многих случаях единственно приемлем в условиях пилотной установки. Однако существующие нормативные документы, которыми руководствуются при расчете нормальных сужающих устройств, налагают ряд ограничений. К ним относится, например, необходимость протока измеряемого газа по трубе диаметром не менее 50 мм. Это ограничивает применение расчетных диафрагм на пилотных установках, технологические линии которых обычно имеют диаметры гораздо меньших размеров.

Известные методики расчета нестандартных диафрагм, в частности, методика, разработанная Воронежским филиалом института „Гипрокаучук“, гарантирует погрешность 5 ÷ 10%, что в условиях сравнительно небольших расходов газа на пилотных установках является совершенно неприемлемым. При пересчете на промышленные расходы такая ошибка может привести к неправильным технико-экономическим показателям проектируемой установки.

Наибольшее распространение на пилотных установках получил метод измерения расхода газов по постоянному перепаду давления с помощью стеклянных ротаметров, но возможность их применения ограничена давлением 2 *ати*, отсутствием вывода данных на картограмму, сравнительно большой погрешностью, значительными монтажными размерами и т. д.

Выпускаемые промышленностью ротаметры с электрическим или пневматическим выходом на вторичный прибор предназначены в основном для измерения сравнительно больших расходов жидких продуктов. Значительные размеры таких приборов также препятствуют их применению на пилотных установках. Для жидкостей используются скоростные расходомеры со свободновращающимся шаром и индукционные.

Практически в настоящее время отечественное приборостроение не в состоянии обеспечить нужды исследовательских организаций в расходомерах газа, удовлетворяющих исследователей на промежуточном этапе разработки процесса — пилотная или полужаводская установка. Достаточно надежная методика расчета сужающих устройств малых размеров также отсутствует.

Из зарубежных расходомеров газа, пригодных к использованию, следует отметить некоторые американские расходомеры, принцип действия которых основан на новом методе, исключаящем применение диафрагм, трубки Вентури и других устройств, ограничивающих поток в трубопроводе.

Датчиком являются два элемента сопротивления, один из которых подогревается. Изменения температуры газа влияют на оба элемента в одинаковой степени, но сопротивление подогреваемого элемента изменяется в зависимости от потока газа. Элементы образуют часть мостовой схемы, в которой изменения сопротивления представляются в качестве измеряемых величин скорости потока. Погрешность измерения скорости газа 2%.

На пилотной установке адсорбционного разделения легких бензинов с помощью молекулярных сит, где нами отработывались системы управления процессом, измерялся и регистрировался расход углекислого газа в пределах 2—12 $\text{н}\cdot\text{м}^3/\text{ч}$ при вариациях давления от 1 до 5 атм . Погрешность измерения с учетом регистрации расхода определялась в 3—4%.

В данном случае был принят метод измерения расхода газа по переменному перепаду давления на нестандартной диафрагме с последующей ее градуировкой.

Первоначально при тарировке в качестве эталона использовалась нормальная диафрагма, рассчитанная и изготовленная по правилам 28—64. Полученный нормальный перепад давления составил 100 мм вод. ст. Расчетная погрешность измерения расхода, отнесенная к верхнему пределу измерения, — не более 1%. Измерение перепада давления на эталонной диафрагме осуществлялось стандартным микроманометром типа ММН, доработанным на давление до 5 атм .

Градуировка диафрагм производилась по схеме (по ходу воздушного потока) эталонная диафрагма — тарируемая диафрагма, т. е. без учета потери давления на поверяемой диафрагме, как это обычно делается при тарировке расходомеров. Указанным способом были отградуированы диафрагмы диаметрами 3,6 и 6 мм на расходы по углекислому газу, соответственно, 6 и 12 $\text{н}\cdot\text{м}^3/\text{ч}$. Градуировка производилась воздухом при давлении 4 атм с последующим пересчетом на расход углекислого газа и другие давления.

По тарировочным данным составлены параболические графики зависимости расхода углекислого газа от перепада давления на диафрагме и давления в системе. Расчетная погрешность нестандартных диафрагм не хуже 3%.

С целью уточнения и возможности сравнения полученных результатов с тарировочными данными принятых диафрагм по другому эталону был смонтирован испытательный стенд, принципиальная схема которого приведена на рисунке.

В основе стенда заложен принцип измерения объема воздуха, пропущенного через тарируемую диафрагму, и продолжительности его пропуска. В отличие от обычно применяемых испытательных стендов, использующих мерные емкости газгольдерного типа с пла-

вающим колоколом, в данном случае для упрощения конструкции принята мерная емкость, работающая с переменным вакуумом.

Чтобы компенсировать влияние колебаний вакуума на расход воздуха, в тарируемой диафрагме применялось следующее.

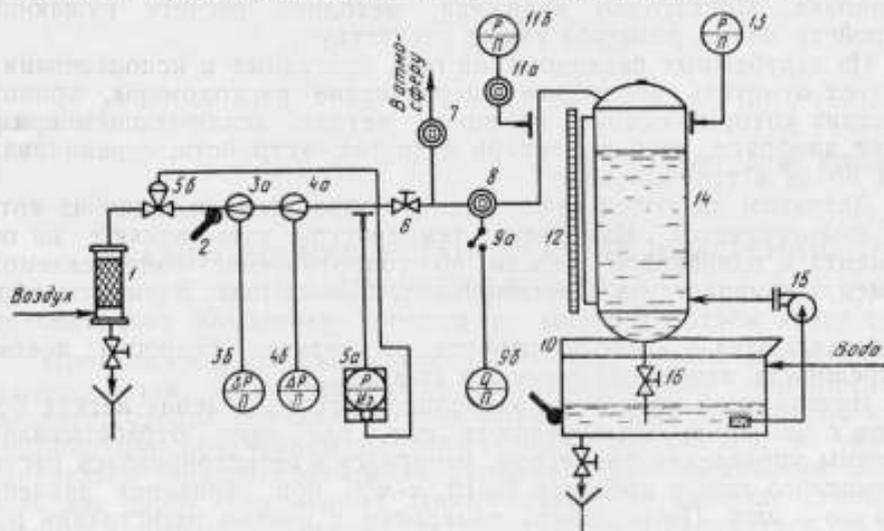


Рис. Схема испытательного стенда.

Испытания проводились при вакууме в мерной емкости не более 1500 мм. вод. ст. и при давлении на диафрагме не менее 2 атм.

Стабилизация давления на тарируемой диафрагме осуществлялась автоматически.

Перепад давления предусматривался на дросселе большого сопротивления. В результате, изменение вакуума по мере заполнения мерной емкости воздухом практически не влияло на его расход.

Стенд оборудован стандартными средствами контроля и автоматики. Для сравнительной оценки тарировочных данных испытания производились одновременно по эталонной диафрагме и по мерной емкости.

Порядок работы на стенде следующий: при открытом положении кранов 7 и 8 мерная емкость 14 с помощью насоса 15 заполняется водой до отметки 1500 мм. Затем кран 8 закрывается, а дренажный вентиль 16 открывается. В результате в мерной емкости устанавливается вакуум. Затем с помощью регулятора 5б и игольчатого вентиля 6 на диафрагмах 3а и 4а устанавливается заданный расход и давление воздуха. В этот момент воздух через воздушный кран уходит в атмосферу. Для подачи воздуха в мерную емкость производится одновременное закрытие крана 7 и открытие крана 8, который с помощью электроконтактного устройства 9а включает электросекундомер 9б, отсчитывающий время подачи воздуха в мерную емкость с погрешностью $\pm 0,01$ сек. Вода в мерной емкости 14 уходит через гидравлический затвор в поддон 10. После пропускa определенного объема воздуха и регистрации всех необходимых параметров воздух через кран вновь подается в атмосферу. Объем пропущенного через диафрагму воздуха измеряется при атмосферном давлении. Для этого в мерную емкость подается вода для снижения вакуума до нуля. Изменение вакуума контролируется

образцовым вакуумметром 13, а нулевой вакуум — водяным манометром 11б. С целью стабилизации температурного режима в мерной емкости используется оборотная вода, циркулирующая между мерной емкостью и поддоном. В установку входят также воздушный фильтр 1, термометр 2, вторичные приборы 3б и 4б, кран водяного манометра 11а. На стенде было отградуировано три комплекта диафрагм диаметром 3,6 мм. Установленные затем на pilotной установке совместно со стандартным дифманометром и вторичным прибором, они показали высокую сходимость по всей шкале измеряемого расхода углекислого газа.

Благодаря использованию нестандартных диафрагм и их градуировке, по расчетной диафрагме и тарировочному стенду удалось решить задачу измерения расхода газа на адсорбционной pilotной установке, полностью ее автоматизировать и снять необходимые технологические показатели процесса.

Выполненная работа носит сугубо практический характер.

К ВОПРОСУ УЧЕТА КОЛИЧЕСТВА НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ, НАХОДЯЩИХСЯ В ТРУБОПРОВОДЕ

Точность определения количества нефтегрузов имеет большое значение при проведении взаиморасчетов предприятий, особенно при внешнеторговых операциях.

Отгрузка нефтей и нефтепродуктов на экспорт осуществляется трубопроводным транспортом (трубопровод «Дружба») и наливными судами.

Основной метод определения количества нефтепродуктов, отгружаемых нефтеналивными судами, — объемно-весовой. Если длина трубопровода от нефтебазы до судна не превышает 2000 м, количество отгружаемой нефти и нефтепродуктов определяется по замерам в резервуарах. В некоторых случаях по требованию получателя данная методика распространяется и на те нефтебазы, у которых длина трубопровода до судна превышает 2000 м. В этом случае учет количества продукта в трубопроводе может сыграть существенную роль при определении количества отгружаемой нефти тем более, что в настоящее время используются трубопроводы диаметрами до 900 мм.

Нормативными документами регламентируется, что при определении количества нефтегрузов по замерам в береговых резервуарах на все резервуары и трубопроводы следует составить калибровочные таблицы, которые должны периодически проверяться и утверждаться в установленном порядке. В документах оговорено, что до проведения замеров в резервуарах трубопровод должен быть опорожнен или заполнен нефтепродуктом того сорта, который запланирован к перекачке. Таким образом, этим определяются условия для учета объема жидкости, находящейся в трубопроводе, но в данных требованиях не указано, как учитывать в последнем случае влияние различных факторов (температура, давление, профиль трассы и т. п.) на изменение объема жидкости в трубопроводе.

Вопросам влияния указанных факторов на результаты количественного учета продуктов в магистральном трубопроводе посвящен ряд работ [1—4]. В некоторых из них [1, 4] проведены теоретические исследования и дана оценка точности влияния отдельных параметров на количественный учет нефтепродуктов при перекачке их по трубопроводу. Однако в этих работах не затронут вопрос влияния изменения плотности, имеющий место при перекачке по одному трубопроводу нефтепродуктов с различными плотностями, на окончательное количество отгружаемого продукта.

На конечный результат существенное влияние оказывает точность учета жидкости, находящейся в нефтепроводе, до и после про-

ведения грузовых операций при отпуске нефтегрузов с нефтебазы на нефтеналивное судно, однако соответствующих норм и правил по точному учету количества нефти в трубопроводе не существует. Формула для расчетов изменения объема продукта в закрытом участке трубопровода под влиянием давления и профиля трассы имеет вид [4]

$$\Delta v = v_r \left(\beta + \frac{d}{\delta E} \right) \left(P_1 + \rho g \frac{\Delta z}{2} \right). \quad (1)$$

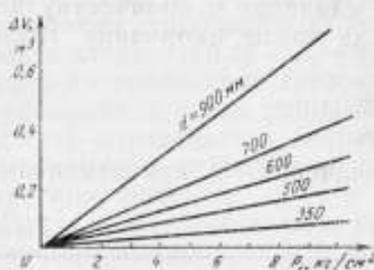


Рис. 1. График изменения объема нефти ($\rho_4^{20} = 0,820 \text{ г/см}^3$) при изменении давления в трубопроводе.

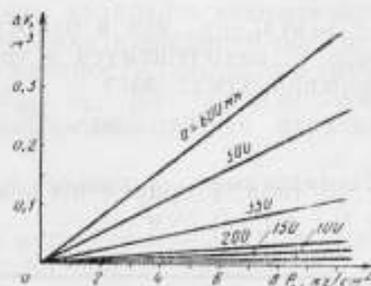


Рис. 2. График изменения объема бензина ($\rho_4^{20} = 0,760 \text{ г/см}^3$) при изменении давления в трубопроводе.

На графиках показано изменение объема нефти с плотностью $0,820 \text{ г/см}^3$ (рис. 1) и бензина с плотностью $0,760 \text{ г/см}^3$ (рис. 2) в зависимости от изменения давления в трубопроводе. Как показывают результаты, при изменении давления до 8 кг/см^2 (для нефти) и 5 кг/см^2 (для бензина) объем жидкости в нефтепроводе изменяется на $0,06\%$ (для нефти) и $0,066\%$ (для бензина) от первоначального геометрического объема трубопровода. Кроме того, изменение профиля трассы нефтепровода с перепадом отметок конца и начала его до 70 м изменяет объем на $0,03\%$. Таким образом, учет изменения давления в трубопроводе и профиля трассы может дать погрешность до $0,097\%$ от величины продукта, находящегося в трубопроводе.

Если будут созданы постоянные условия хранения продукта в трубопроводе до и после проведения грузовых операций с сохранением в нем величины объема продукта, то и в этом случае количество продукта может меняться из-за различия его плотности в трубопроводе. Обычно на танкер производятся отгрузки от 4000 до 100000 т нефтегрузов, причем груз одного и того же наименования, отпускаемый из разных резервуаров, может отличаться по плотности на величину $0,001 - 0,1$. Например, плотность продуктов одного наименования колеблется в пределах (г/см^3):

бензин	0,712 — 0,760,
керосин	0,793 — 0,826,
дизтопливо	0,831 — 0,863,
нефть обессоленная	0,800 — 0,906.

Почти всегда плотность продукта, подготовленного к отгрузке, отличается от плотности продукта, находящегося в трубопроводе. В зависимости от расхождения плотностей изменяется и величина количества продукта, находящегося в трубопроводе до и после перекачки через него нефтегруза.

Пусть трубопровод длиной L и диаметром d был заполнен продуктом плотности ρ_1 . После перекачки нефтегруза плотности ρ_2 трубопровод остался также в заполненном состоянии. При этом количество продукта, находящееся в трубопроводе до и после перекачки через него нефтегруза, изменилось на величину

$$\Delta G = \frac{\pi d^2}{4} L \Delta \rho, \quad (2)$$

где $\Delta \rho = \rho_1 - \rho_2$, что в относительных единицах к количеству нефтегруза G , находящемуся в трубопроводе после окончания грузовых операций, составляет

$$\delta G = \frac{\Delta G}{G} \cdot 100\% = \frac{\Delta \rho}{\rho_2} \cdot 100\%. \quad (3)$$

В табл. 1 приведены некоторые значения δG при изменениях ρ_2 от 0,7 до 1,0 г/см³.

Таблица 1

$\pm \Delta \rho, \text{ г/см}^3$	0,001	0,005	0,01	0,05
$\pm \delta G \%$	0,1—0,14	0,5—0,7	1,0—1,4	5,0—7,1

Из формулы (3) видно, что величина δG зависит от $\Delta \rho$ и ρ_2 и не зависит от длины и диаметра трубопровода.

Предположив, что плотность нефтепродуктов и нефти находится в пределах от 0,7 до 0,9 г/см³ и разовые поставки в объемных единицах составляют $v^{\text{отп}} = 4500 - 125000 \text{ м}^3$, найдем относительную величину погрешности от поставки, возникающую за счет погрешности учета продукта в трубопроводе, по формуле

$$\delta G_{\tau}^{\text{отп}} = \frac{v}{v^{\text{отп}}} \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho_2} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где v — объем участка трубопровода, по которому производится перекачка нефтегруза;

$v^{\text{отп}}$ — объем отпущенного количества груза.

Результаты расчетов предельных значений $\delta G_{\tau}^{\text{отп}}$ (в процентах) для различных ρ_2 при условии, что диаметры трубопроводов находятся в пределах от 150 до 700 мм, приведены в табл. 2.

Таблица 2

$\frac{\Delta \rho}{L}$	$\pm 0,001$	$\pm 0,005$	$\pm 0,01$	$\pm 0,05$
2000	$\pm (0,0001 - 0,02)$	$\pm (0,0005 - 0,12)$	$\pm (0,0011 - 0,24)$	$\pm (0,0055 - 1,20)$
7000	$\pm (0,0004 - 0,08)$	$\pm (0,002 - 0,42)$	$\pm (0,004 - 0,84)$	$\pm (0,02 - 4,2)$
15000	$\pm (0,0008 - 0,18)$	$\pm (0,004 - 0,9)$	$\pm (0,0085 - 1,81)$	$\pm (0,04 - 9,05)$
26000	$\pm (0,0015 - 0,81)$	$\pm (0,0075 - 1,56)$	$\pm (0,0149 - 3,1)$	$\pm (0,075 - 15,6)$

Если не учитывать расхождения между плотностью продукта, находящегося в трубопроводе до и после проведения грузовых операций, то величина изменения количества продукта в трубопроводе может достигать нескольких процентов от величины отпускаемого нефтегруза.

С целью учета изменения количества продукта, находящегося в трубопроводе, и вычисления величины поправки в зависимости от расхождения плотностей при определении отгружаемого количества нефтегруза построена номограмма (рис. 3).

По номограмме в практических условиях, если в трубопроводе до и после отгрузки сохраняется постоянный объем продукта, можно определить поправку (в тоннах) к количеству нефтегруза, отгружаемого с нефтебазы. Для определения поправки, зная внутренний диаметр d и длину L трубопровода, в нижнем квадранте находим величину объема трубопровода v . На основании известного объема и разности плотностей $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$ (где ρ_1 — плотность продукта в трубопроводе до проведения грузовых операций; ρ_2 — плотность продукта в трубопроводе после проведения грузовых операций) по верхнему квадранту определяется поправка.

Рассмотрим определение поправки с помощью номограммы на конкретном примере.

Пусть нефтебаза должна произвести отгрузку $G = 30000$ т нефти, плотность которой $\rho_2 = 0,88$ т/м³, по трубопроводу длиной 1000 м и диаметром 700 мм. Трубопровод до начала погрузки на танкер заполнен нефтью, плотность которой равна $\rho_1 = 0,8$ т/м³. После проведения операций по погрузке на танкер береговые замеры показали, что на танкер было погружено $G_g = 30000$ т нефти, и трубопровод остался также в заполненном состоянии.

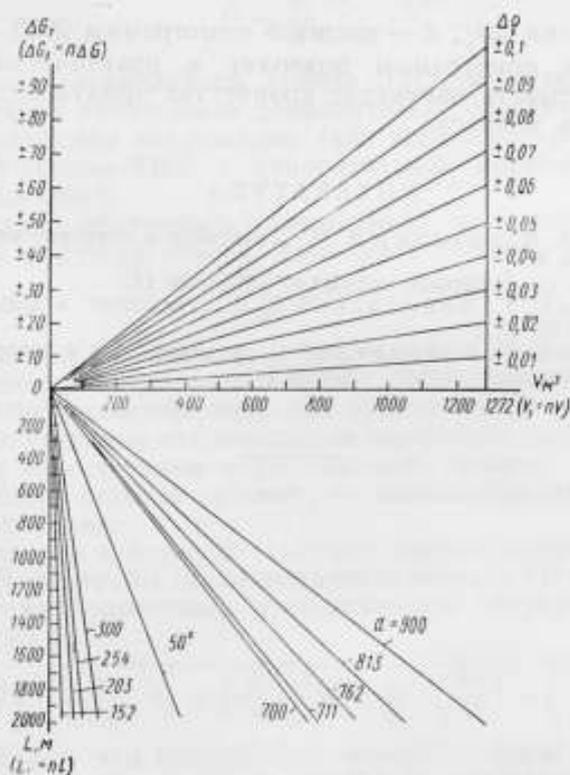


Рис. 3. Номограмма определения поправок (ΔG_x) в трубопроводах при различных $\Delta\rho_4$.

Для определения поправки сначала определим объем трубопровода, для чего на луче $d = 700$ мм находим абсциссу точки, ордината которой равна $L = 1000$. Численная величина абсциссы, как следует из номограммы, равна $v = 384,6$. Затем в верхнем квадранте номограммы, на луче, соединяющем точку $\Delta\rho = -0,08$ шкалы разности плотностей с началом координат 0, находим ординату точки, абсцисса которой имеет значение, равное найденной величине $v = 384,6$.

Численное значение ординаты дает величину поправки $\Delta G_T = -30,7$, причем величина принимается с тем же знаком, что и $\Delta\rho$. При определении количества отгружаемой с нефтебазы на наливное судно нефти поправку, найденную таким образом, прибавляют к количеству, определяемому по береговым замерам (резервуарам):

$$G^{от} = G_0 + \Delta G_T = 30000 - 30,7 = 29969,3 \text{ т.}$$

Следовательно, несмотря на то, что из резервуаров было отпущено 30000 т нефти, фактически на судно было погружено 29969,3 т.

Данной номограммой можно пользоваться и при определении поправки для участков трубопровода, длина которых больше величины, приведенной на масштабной шкале. В этом случае необходимо при определении масштаба воспользоваться формулами, которые приведены на номограмме в скобках, поставив в них значения $n = \frac{L_1}{L}$ (где L_1 — длина трубопровода, для которого мы хотим найти величину поправки ΔG_T , L — масштаб номограммы 2000 м).

Применение номограммы позволит в практических условиях оперативно учитывать изменение количества продукта в трубопроводе и повысить точность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филютов А. В., Качалин В. М. „Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов“, 1967, № 3.
2. Маслов Л. С. „Нефтяное хозяйство“, 1963, № 11.
3. Щербаков С. Г., Бобровский С. А. „Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов“, 1967, № 8.
4. Щербаков С. Г., Бобровский С. А. „Транспорт и хранение нефтепродуктов и нефтехимического сырья“, 1967, № 1.

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРУБОПОРШНЕВЫХ
УСТАНОВОК ДЛЯ ПОВЕРКИ РАСХОДОМЕРОВ

В технической литературе широко освещено применение трубопоршневых установок (ТПУ) для поверки счетчиков жидкости (и в первую очередь нефтепродуктов) в условиях эксплуатации [2, 3, 4] с погрешностью порядка 0,02 ÷ 0,05%. Известны также попытки использовать трубопоршневые установки для поверки расходомеров.

В настоящее время сформулированы дополнительные требования, необходимые для нормальной работы ТПУ в качестве расходомерной поверочной установки повышенной точности. Они сводятся в основном к следующему.

1. Из формулы

$$Q = \frac{V_0}{t}, \quad (1)$$

где V_0 — объем калибровочной секции ТПУ, m^3 , следует, что для измерения расхода необходимо дополнительно обеспечить определение времени движения поршневого (или шарового) разделителя по калибровочной секции ТПУ с относительной предельной погрешностью порядка 0,01%.

2. Необходимо обеспечить равномерное движение разделителя во времени, т. е. строго говоря, выполнить условие

$$\frac{dV}{dt} = 0. \quad (2)$$

3. Для поверки расходомеров, измеряющих расход в массовых единицах, необходимо дополнительное применение высокоточного плотномера либо пробоотборника для отбора средней пробы.

Если из выпускаемых отечественной промышленностью электронных цифровых частотомеров можно выбрать прибор, который обеспечит выполнение первого условия, то выполнение второго условия требует рассмотрения.

Выразив расход в формуле (1) через произведение площади поперечного сечения трубы (калибровочного участка ТПУ) на среднюю скорость v , можно определить относительную погрешность измерения расхода:

$$\frac{\delta Q}{Q} = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial v_0}\right)^2 \delta_{v_0}^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial F}\right)^2 \delta_F^2} = \sqrt{\left(\frac{\delta_F}{F}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{v_0}}{v_0}\right)^2}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что погрешность измерения расхода будет определяться точностью изготовления трубы по внутреннему диаметру и изменением скорости потока рабочей жидкости в трубопоршневой установке.

Рассмотрим первый фактор. В современном производстве возможно изготовление трубы с обработкой внутренней поверхности расточкой, шлифовкой и хонингованием по второму классу точности, что позволяет получить погрешность обработки $\pm 0,045$ мм на трубах диаметром $0,2 + 1$ м. Следовательно, относительная погрешность $\frac{\delta_F}{F}$ составляет 0,0005%.

Скорость движения поршня в калибровочной секции ТПУ, согласно [1], для установившегося режима в первом приближении имеет вид

$$v = \sqrt{\frac{2gd(\Delta PF - mg \sin \alpha - T)}{\lambda \gamma F}} \quad (4)$$

В том случае, когда труба установлена горизонтально ($\alpha = 0$), член $mg \sin \alpha$ равен нулю. Силу трения T в установившемся режиме можно считать постоянной величиной [1]. Величины λ и γ также можно считать постоянными, поэтому изменение средней скорости может зависеть только от перепада давления ΔP .

Рассмотрим схему питания трубопоршневой установки от напорного резервуара, поднятого на заданную высоту H (рис. 1).

Если поршень ТПУ находится в крайнем левом положении трубы, то слева от него действует давление P_1 , а справа — давление P_2 :

$$P_2' = P_2 + \frac{\lambda \gamma l}{2gd} v^2.$$

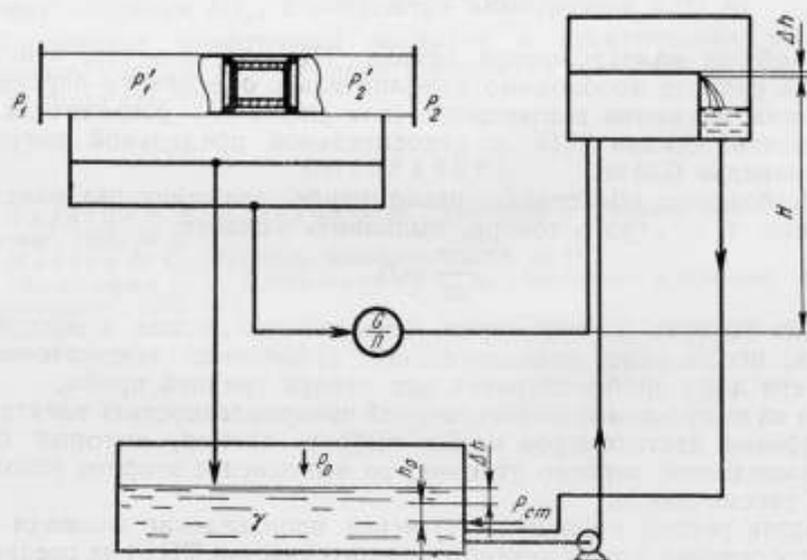


Рис. 1. Принципиальная схема установки.

Перепад давления на поршне равен

$$\Delta P = P_1 - P_2 - \frac{\lambda \gamma l}{2gd} v^2, \quad (5)$$

где $l = L - l_n$;

L — длина трубы ТПУ;

l_n — длина поршня.

Пусть поршень под действием перепада давления переместился на расстояние dl , тогда

$$P'_1 = P_1 - \frac{\lambda \gamma dl}{2gd} v^2, \quad P'_2 = P_2 + \frac{\lambda \gamma l}{2gd} v^2 - \frac{\lambda \gamma dl}{2gd} v^2.$$

Подставим эти значения в формулу (3) и после сокращения получим

$$\Delta P = P_1 - \frac{\lambda \gamma l}{2gd} v^2 - P_2.$$

Из последней формулы видно, что перепад давления ΔP не зависит от положения поршня в калибровочной секции ТПУ.

Рассмотрим теперь условия поддержания давлений P_1 и P_2 . Если при постоянном давлении P_2 задаться величиной напора H , то относительная погрешность, возникающая от изменения статического давления, остаточной величины пульсации насоса и т. д., определится формулой

$$\delta = \frac{\Delta H}{H} \cdot 100\%. \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что с целью снижения этой погрешности необходимо либо уменьшать величину пульсации, например, применяя переливные лотки и увеличивая поверхность водослива, либо, при заданной величине пульсаций, нужно выше поднимать напорный резервуар.

Рассмотрим теперь участок справа от разделительного поршня, через который жидкость подается из трубопоршневой установки в сливной резервуар (см. рис. 1).

В этом случае

$$P'_2 = P_{ст} + \Delta P_c, \quad (7)$$

где $P_{ст}$ — статическое давление в точке входа жидкости в сливной резервуар.

Если давление на свободной поверхности обозначить $P_{св}$, то

$$P_{св} = P_0 \quad \text{и} \quad P_{ст} = P_0 + \gamma h_0 + \gamma \Delta h.$$

Суммарная потеря давления на участке

$$\Delta P_c = \Delta P_\lambda + \Delta P_m = \lambda \frac{l \gamma}{2gd} v^2 + \Sigma \xi \frac{v^2}{2g},$$

где ΔP_m — перепад давления на регулировочном вентиле;

ΔP_λ — потеря давления на правом участке трубопровода.

Тогда

$$P'_2 = P_0 + \gamma(h_0 + \Delta h) + \lambda \frac{\gamma l v^2}{2dg} + \Sigma \xi \frac{v^2}{2g}. \quad (8)$$

Из (8) видно, что давление P'_2 в общем случае складывается из атмосферного давления P_0 , изменения уровня жидкости, если сливной трубопровод подключен ниже уровня, потери давления на длине трубопровода и на регулировочном вентиле.

Погрешность от изменения уровня жидкости можно исключить, если сливной трубопровод подсоединен выше уровня жидкости. Гидравлическое сопротивление ΔP_λ медленно увеличивается во времени вследствие коррозии внутренней поверхности и отложения осадков, поэтому за время проверки оно может считаться постоянным.

О погрешности от изменения статического давления P_0 было сказано выше.

С целью исключения погрешности от пульсации и медленного изменения статического давления целесообразно при проектировании создавать некоторый запас напора, чтобы обеспечить больший перепад давления на регулировочном вентиле.

На практике при некоторых значениях расхода иногда наблюдается колебание давления из-за вибрации „иглы“ регулировочного вентиля. В этом случае необходимо следить, чтобы величина относительной погрешности не превышала расчетной величины, определяемой по формулам (3), (4) и (6), например, 0,02%.

Теперь определим частотный диапазон работы трубопоршневой установки. При подаче на вход ТПУ возмущения, создаваемого периодически перемещением регулирующего органа, по закону

$$x_{\text{вх}} = A \sin \omega t, \quad (9)$$

и фиксации амплитуды A , частоты ω входных колебаний, по амплитуде M и величине сдвига фазы φ выходных установившихся колебаний, можно экспериментально построить точку амплитудно-фазовой характеристики на комплексной плоскости:

$$W(j\omega) = \frac{M}{A} e^{j\varphi(\omega)}. \quad (10)$$

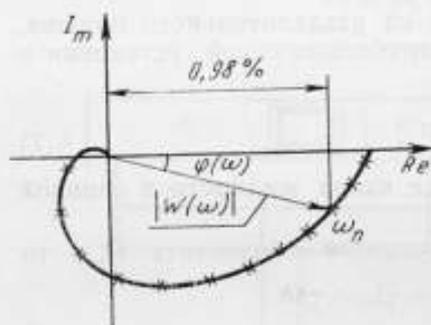


Рис. 2. Частотная характеристика трубопоршневой установки.

Аналогично ряд фиксированных частот ω при неизменной амплитуде входных колебаний позволит построить на этой плоскости годограф амплитудно-фазовой характеристики ТПУ.

Задаваясь величиной допустимой дополнительной частотной погрешности ТПУ, например, 0,02%, по графику (рис. 2) находят предельную частоту ω_n , на которой проекция модуля $W(j\omega_n)$ уменьшится до величины 0,98% от его номинального значения.

Таким образом, частотный диапазон трубопоршневой установки находится в пределах $0 < \omega < \omega_n$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Туниченко А. А., Меньшиков Б. Н., Валенцукевич Е. И. Некоторые вопросы гидродинамики трубопоршневых расходомерных установок. (См. настоящий сборник).
2. Под ред. Балаева Р. Д. Новые приборы и оборудование на трубопроводном транспорте и нефтебазах за рубежом. М., ВНИИОЭНГ, 1966.
3. Проспект фирмы Kent Industrial Instrument Ltd, 1968.
4. Устройство для калибровки расходомеров. Патент США, 1960, № 2948144.

ПНЕВМО-МЕХАНИЧЕСКИЙ СПОСОБ СТАБИЛИЗАЦИИ НАПОРА ЖИДКОСТИ ДЛЯ ОБРАЗЦОВЫХ РАСХОДОМЕРНЫХ УСТАНОВОК

Масштабы современного технического прогресса приводят к неуклонному увеличению количества и повышению качества различных измерительных средств, используемых в народном хозяйстве. Важной задачей является обеспечение нужд промышленности и научно-технического эксперимента измерительной базой с высокими технико-экономическими показателями.

Эти требования предъявляют и к расходомерной технике, получившей за последние годы особенно интенсивное развитие. Во многих случаях при измерениях расхода жидкостей используют расходомеры, для градуирования и поверки которых нужны расходомерные установки, позволяющие достоверно и точно воспроизводить величины расхода.

Одной из отличительных особенностей расходомерных установок универсального назначения, т. е. приспособленных для градуирования расходомеров как интегрирующего типа, так и мгновенного значения расхода, является требование высокой стабильности потока жидкости по давлению и расходу в измерительных участках их гидравлических трактов.

В зарубежной и отечественной практике [1] из-за отсутствия других средств принято использовать для целей стабилизации потока дорогие и громоздкие напорные башни с расположенными на высоте порядка 30 м резервуарами постоянного уровня емкостью до 30 м³. При всей дороговизне башенный способ стабилизации потока, как наиболее качественный, продолжает оставаться предпочтительным. Современная техника нуждается не в отдельных, а во многих экземплярах образцовых расходомерных установок, которые начинают становиться принадлежностью НИИ, ОКБ и заводов.

Современные установки должны быть относительно недорогими, компактными и удобными в эксплуатации. Одной из задач в направлении их целесообразного конструирования является замена башни соответствующим механическим аналогом. Такой аналог — пневмо-механический стабилизатор напора жидкости — был разработан и показал вполне удовлетворительные результаты.

Заметим, что сущность образцовой расходомерной установки в самом общем виде раскрывается в ее способности решать технические задачи: во-первых, обеспечивать высокую стабильность рас-

хода рабочей жидкости и, во-вторых, высокую точность измерения среднего объемного или массового расхода рабочей жидкости.

Решение первой задачи, гарантирующее равенство мгновенного расхода среднему, измеренному по объему или массе жидкости, слитой в мерный бак установки, является, кроме того, условием жесткого фиксирования на контрольном расходе указателя шкалы поверяемого расходомера, чем устраняется неопределенность градуировочного отсчета по шкале и исключается вполне определенный класс случайных погрешностей метода.

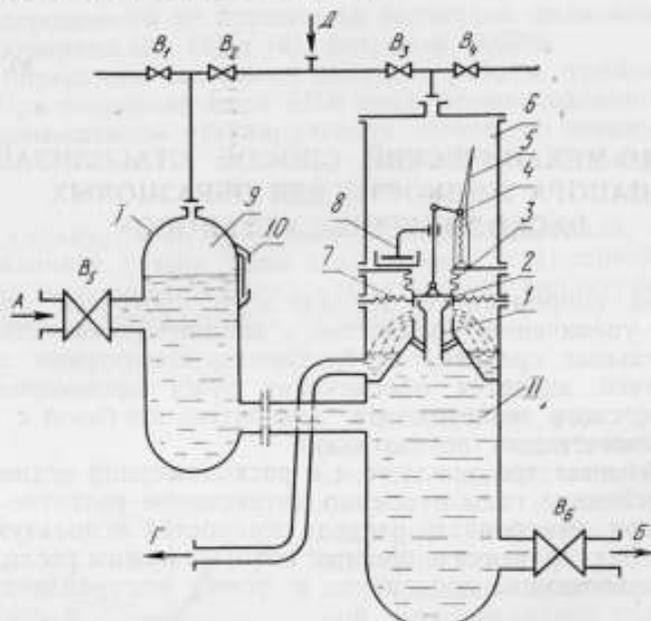


Рис. 1. Принципиальная схема пневмо-механического стабилизатора напора жидкости.

Принципиальная схема пневмо-механического стабилизатора напора жидкости показана на рис. 1. Устройство состоит из газожидкостного успокоителя I, регулятора давления II, вентилях B_1, B_2, B_3, B_4 подачи сжатого воздуха и вентилях B_5, B_6 , регулирующих расход жидкости на выходе стабилизатора.

Успокоитель I состоит из резервуара и выходного трубопровода [2]. В верхнюю часть резервуара через вентиль B_2 подается сжатый воздух, и над жидкостью создается газовая подушка 9. С помощью уровнемерного стекла 10 контролируется необходимая высота столба жидкости. Величина потока жидкости за успокоителем определяется давлением воздуха подушки и суммой сопротивлений выходного трубопровода. Масса жидкости в резервуаре и выходном трубопроводе успокоителя представляет для высокочастотных составляющих потока значительное динамическое сопротивление, благодаря которому, а также сопротивлению трения в трубопроводе и упругости газовой подушки, высокочастотные пульсации сглаживаются, а низкочастотные свободно проходят к регулятору давления.

На рис. 2 дана характеристика коэффициента стабилизации успокоителя k — числа, показывающего, во сколько раз на определенной,

фиксированной частоте ослабляется амплитуда пульсации на выходе устройства по сравнению с амплитудой на входе. Как видим, эта характеристика при нулевой частоте растет от единицы по мере повышения частоты пульсации.

Регулирующий механизм регулятора давления *II* (см. рис. 1) состоит [3] из заслонки 2, ограниченной от радиального перемещения упругой центрирующей шайбой 7, разделительного сальфона 3, преобразующего давление воздуха полости *b* в усилие; пружины 4 и рычага 5 — пружинного компенсатора жесткости, с помощью которого в пределах рабочего хода заслонки обеспечивается практически безразличное состояние, или, иначе, нулевая жесткость всего механизма.

В полости над заслонкой открытием и последующим герметичным закрытием вентиля *B₃*, соединенного с трубопроводом сжатого воздуха *D*, устанавливается давление воздуха, которое является опорным. В процессе работы регулятора с этим давлением непрерывно и автоматически сравнивается статический напор жидкости по другую сторону заслонки, отбираемый через канал в дефлекторе *I* из полости регулятора с малыми скоростями потока. Дефлектор установлен на пилонах.

Неравенство давлений воздуха и жидкости или их непропорциональность при неравных эффективных площадях обеих сторон заслонки вызывает нарушение равновесия ее механизма. Вследствие этого заслонка увеличивает или уменьшает сечение слива в сторону восстановления баланса сил, чем обуславливается неизменность статического напора жидкости в полости регулятора давления. Профилированный дефлектор *I* исключает динамическое воздействие на заслонку со стороны сливаемой жидкости.

Таким образом, низкочастотные пульсации потока на входе регулятора давления вызывают в его полости изменение статического напора жидкости и приводят к синфазному перемещению заслонки, управляющей сливом. Результатом такого перемещения будет поддержание в полости регулятора давления жидкости с точностью до нечувствительности механизма заслонки.

При работе стабилизатора должно иметь место допустимое термодинамическое изменение давления воздуха в полости над заслонкой, вызванное ее рабочим ходом. Стабилизатор работает в режиме постоянного слива через заслонку части жидкости, поступающей от насосов. Величина слива составляет 8—10% от номинальной подачи насосов. Необходимое в расходомерных установках регулирование расхода на выходе *B* регулятора давления производится в самом простейшем виде посредством вентилях *B₅* и *B₆*, которые или оба открываются, или оба прикрываются настолько, чтобы при изменении выходного расхода сохранялась примерно постоянная величина перелива *Г*, контролируемая визуально по положению заслонки.

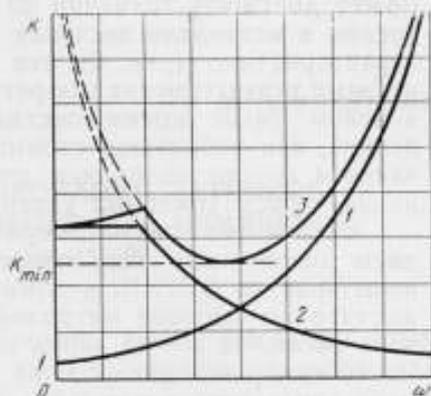


Рис. 2. Характеристики коэффициентов стабилизации:

1 — успокоитель; 2 — регулятор давления; 3 — пневмо-механический стабилизатор в целом; 4 — угловая частота.

Масляный катаракт 8 обеспечивает устойчивость работы регулятора давления.

Регулятор давления 2 (см. рис. 2) имеет круто возрастающую по мере понижения частоты пульсаций характеристику коэффициента стабилизации. Характеристика стабилизатора напора в целом охватывает высоким коэффициентом стабилизации широкий спектр пульсаций потока. При этом минимальный коэффициент стабилизации может достигать значений 30 и более и ограничивается лишь силами трения в механизме заслонки регулятора давления. На приведенной характеристике (рис. 2) это ограничение иллюстрируется левыми ветвями характеристик как регулятора давления, так и стабилизатора в целом. Такие преимущества пневмо-механического стабилизатора напора, как небольшая стоимость, компактность, простота обслуживания и другие, позволяют считать его целесообразным для применения в расходомерных установках универсального назначения.

Образцовая расходомерная установка, построенная с применением описанного стабилизатора напора, прошла аттестационные испытания во ВНИИК и помимо полной работоспособности показала достаточно высокие метрологические характеристики. Так, в диапазоне расходов $1 \div 35$ кг/сек воды предельная относительная погрешность измерения расхода на ней при градуировании расходомеров всех типов составляет 0,2% от измеряемой величины. При градуировании расходомеров интегрирующего типа, таких, как крыльчатотактометрические, относительная погрешность измерения расхода составляет 0,15% от измеряемой величины.

В настоящее время на установке проводится текущая поверочная и исследовательская работа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павловский А. И. Измерение расхода и количества жидкостей, газа и пара. М., Изд-во стандартов, 1967.
2. Кремлевский П. П. Сглаживание пульсирующих потоков жидкости, газа и пара. Теплоэнергетические приборы и регуляторы. Вып. 3, М.—Л., Машиз, 1965.
3. Заря Ю. И., Панкрашкин А. А. Регулятор постоянного давления жидкости. Авторское свидетельство СССР. № 148605, „Бюллетень изобретений“, 1962, № 13.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДАТЧИКОВ РАСХОДА С ТЕЛОМ ОБТЕКАНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Измерение расхода вязких жидкостей, таких, как нефть и нефтепродукты, с высокой точностью — одна из сложных и нерешенных проблем нефтяной промышленности.

Трудность создания средств измерения заключается в том, что физические свойства и характер течения таких жидкостей постоянно изменяются. Кроме того, нефть в своем составе содержит газ, воду в виде эмульсии, механические включения горных пород, смолистые вещества, грязь и парафин.

Парафин, грязь и смолистые вещества оседают на чувствительном элементе и гидравлическом тракте прибора, а механические включения горных пород выводят из строя сочленения подвижных элементов прибора.

Расходомеры, выпускаемые промышленностью, в указанных условиях не надежны в работе или имеют высокую погрешность до 5% и более, в то время как она должна быть 0,25 — 2,5% в диапазоне $\frac{Q_{\max}}{Q_{\min}}$ от пяти до десяти.

Наиболее близко указанным требованиям отвечает датчик расхода, принцип действия которого основан на измерении гидродинамического давления потока, воспринимаемого телом обтекания, которое уравнивается измерительным упругим элементом. Величина перемещения тела обтекания пропорционально преобразуется в электрическую величину и является мерой измерения расхода.

Измерительным упругим элементом датчика является торсионная трубка.

При действии силы гидродинамического давления P на тело обтекания 4, соединенного с осью 3, торсион 2 закручивается на величину, равную величине расхода (рис. 1). Для вывода и передачи величины перемещения тела обтекания из рабочей зоны датчика к электрическому преобразователю в торсионной трубке пропущена штанга 5, жестко закрепленная в оси 3.

Сила гидродинамического давления потока, действующая на тело обтекания [2, 3]

$$P = C_x \frac{\rho v^2}{2} F_{z.o} \cos \alpha, \quad (1)$$

где ρ — плотность жидкости;
 v — скорость потока жидкости;
 $F_{т.о}$ — площадь тела обтекания;
 α — угол поворота тела обтекания;
 C_x — коэффициент сопротивления тела обтекания, характеризующий неравномерность поля скоростей

$$C_x = \frac{1}{F_{гт}} \int_{F_{гт}} \left(\frac{v}{v_{ср}} \right)^3 df,$$

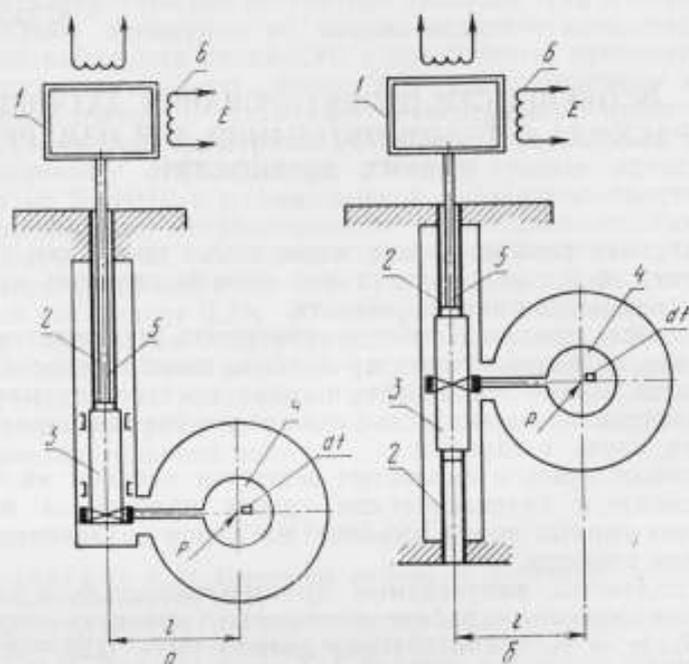


Рис. 1. Принципиальные схемы датчиков расхода с телом обтекания:

a — измерительный упругий элемент с консольным зажимлением; b — измерительный упругий элемент с двусторонним зажимлением; 1 — ротор; 2 — торсион; 3 — ось; 4 — тело обтекания; 5 — штанга; 6 — статор.

где $F_{гт}$ — площадь гидравлического тракта.

Поскольку наибольшее значение угла поворота тела обтекания α равно 60 геометрическим минутам, видимую площадь тела обтекания (площадь миделевого сечения) можно считать не зависящей от угла:

$$P = C_x \frac{\rho v^2}{2} F_{т.о}. \quad (2)$$

Вращающий момент, возникающий при действии силы гидродинамического давления на тело обтекания

$$M_{вр} = Pl = C_x \frac{\rho v^2}{2} F_{т.о} L, \quad (3)$$

где l — расстояние от центра тела обтекания до оси торсионной трубки.

При закручивании торсионной трубки на угол α возникает противодействующий момент

$$M_{\text{пр}} = \frac{I_p G' \alpha}{L}, \quad (4)$$

где I_p — полярный момент инерции сечения торсионной трубки;
 G' — модуль сдвига (модуль второго рода) материала торсионной трубки;

L — длина торсионной трубки.

При установившемся движении

$$M_{\text{вп}} = M_{\text{пр}}. \quad (5)$$

Подставляя в выражение (5) значения (3), (4) и решая относительно α , получим

$$\alpha = \frac{C_x \rho F_{\tau,0} l L v^2}{2 I_p G'}. \quad (6)$$

Выражение (6) справедливо для измерительного упругого элемента с консольным (см. рис. 1а) и двусторонними защемлениями при предварительно винтообразной закрутке обоих торсионов (рис. 1б) в случае гистерезисной и температурной компенсации.

При двустороннем защемлении измерительного упругого элемента, выполненного без предварительной закрутки,

$$\alpha = C_x \frac{\rho F_{\tau,0} l a \cdot \delta v^2}{2 I_p G' L_1}, \quad (7)$$

где a , δ — длина первого и второго торсионов;

$$L_1 = a + \delta.$$

Из формулы (6) находим объемный расход —

$$Q = \sqrt{\frac{2 a I_p G' (F_{\tau,1} - F_{\tau,0})^2}{C_x \rho F_{\tau,0} l L}} = S_{ж.с} \sqrt{\frac{2 a I_p G'}{C_x \rho F_{\tau,0} l L}}, \quad (8)$$

массовый расход —

$$G = S_{ж.с} \sqrt{\frac{\rho}{51} \frac{I_p G' \alpha}{C_x F_{\tau,0} l L}}. \quad (9)$$

Из формул (8) и (9) видно, что показания датчика зависят от плотности измеряемой среды ρ и коэффициента сопротивления C_x .

При изменении плотности измеряемой среды в больших пределах на потоке устанавливается плотномер, и в показания датчика вводится коррекция по плотности.

Коэффициент сопротивления C_x зависит от геометрических размеров и конфигурации тела обтекания, гидравлического тракта датчика, физических свойств и характера течения жидкости:

$$C_x = f\left(\frac{K t v^2}{\nu}\right), \quad (10)$$

где K — отношение площадей гидравлического тракта к телу обте-

$$\text{кания } K = \frac{F_{\tau,1}}{F_{\tau,0}};$$

$t v$ — произведение времени t прохождения элементарной частицы жидкости высоты кромок тела обтекания на скорость потока v характеризует высоту тела обтекания ($b = t v$).

Если тело обтекания площадью $F_{т.о}$ выполнить в виде сплошного диска или пластины, то скорость потока при набегании на него резко изменяется, образуя большое количество вихрей и вихревых шнуров. Последние переходят в единый вращающийся шнур, создающий отрицательное пульсирующее давление с обратной стороны тела обтекания, вызывающее колебание тела обтекания с большой амплитудой, которая приводит к искажению показаний прибора.

Идеальным телом обтекания, охватывающим все поле скоростей и незначительно изменяющим направление потока, является диск, выполненный в виде решетки с наружным радиусом, равным радиусу гидравлического тракта прибора. Однако создание такого тела обтекания связано с техническими трудностями, и, кроме того, оно подвергнется быстрому засорению механическими примесями, которые, как правило, перемещаются по периферии гидравлического тракта.

Наиболее достоверные результаты измерений могут быть получены с телом обтекания, выполненным в виде концентрических колец, соединенных между собой перемычками, с наружным радиусом, равным среднему арифметическому значению ламинарного и турбулентного течений средних значений поля скоростей [1, 3]:

$$r_{т.о} = \frac{r_{лам} + r_{турб}}{2} = 0,7535 r, \quad (11)$$

где r — радиус гидравлического тракта прибора.

За таким телом обтекания образуемые вихри не переходят в единый вращающийся шнур, и отрицательное давление остается постоянным.

Количество концентрических колец выбирается в зависимости от диаметра гидравлического тракта. Площадь концентрических колец и перемычек устанавливается в зависимости от величины воспринимаемого гидродинамического давления и жесткости самого тела обтекания.

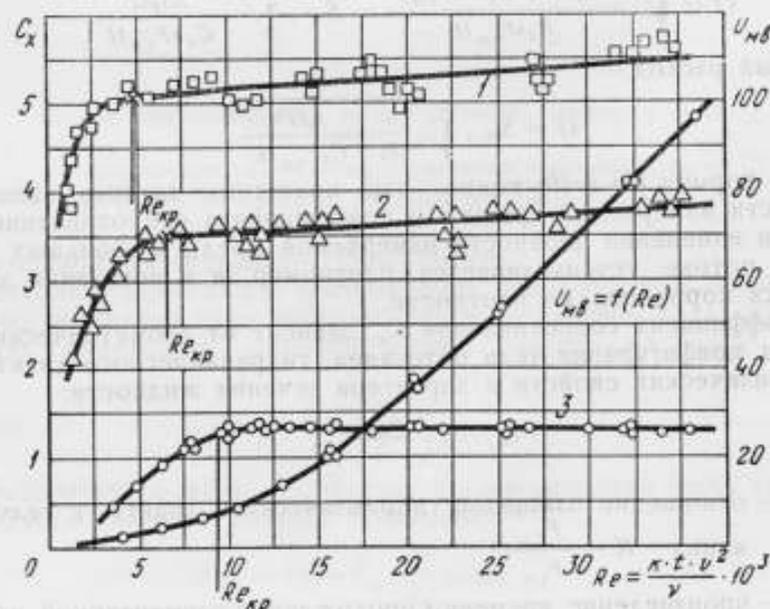


Рис. 2. Функциональные зависимости:

1 — прямоугольная пластина; 2 — диск; 3 — концентрические кольца.

Функциональная зависимость (10) определяется экспериментально, по ее значению находят оптимальные параметры тела обтекания, гидравлического тракта и измерительного упругого элемента.

Такая функциональная зависимость получена для тела обтекания, выполненного в виде прямоугольной пластины, диска и концентрических колец (рис. 2).

На рис. 2 видим, что при одних и тех же значениях K коэффициент C_x различен. Для прямоугольной пластины 1 и диска 2 коэффициент C_x больше, чем обтекания, выполненного в виде концентрических колец, и изменяется во всем диапазоне измерения расхода.

Экспериментально установлено, что наилучшие показания, при которых коэффициент C_x имеет постоянное значение во всем диапазоне изменения расхода, получены для датчика расхода с телом обтекания, имеющим количество концентрических колец не менее двух при диаметре гидравлического тракта прибора $D = 100$ мм или

$$n = (0,02 \div 0,05) D, \quad (12)$$

наружный радиус $r_{т.о}$ (11) и внутренний радиус малого концентрического кольца

$$r_n = (0,25 \div 0,33) r_{т.о}. \quad (13)$$

За критическим числом Рейнольдса $Re_{кр}$ $C_x = const$ показания датчика не зависят от физических свойств и характера течения жидкости.

Нижний предел измерения в этом случае

$$V_{min} = \frac{Re_{кр} \nu}{Ktv}. \quad (14)$$

На рис. 3 приведена функциональная зависимость, связывающая между собой значения C_x , K_1 и $Re_{кр}$, которая необходима для расчета датчика.

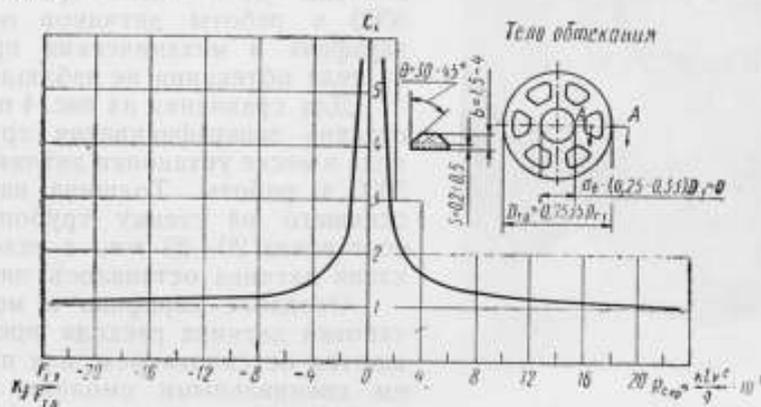


Рис. 3. Функциональные зависимости $C_x = f(K_1 Re_{кр})$.

При взаимодействии тела обтекания с потоком жидкости возникает вязкостное трение, для уменьшения которого проводится затыловка радиальных поверхностей тела обтекания под углом $Q = 30 - 45^\circ$, высотой кромок $S = 0,2 - 0,5$ мм.

Тело обтекания вместе с измерительным упругим элементом представляет собой систему, колеблющуюся при взаимодействии с

потоком. Колебание тела обтекания необходимо для процесса самоочистки при измерении расхода загрязненных жидкостей.

При столкновении колеблющегося тела обтекания с парафином, грязью и другими механическими примесями часть из них разбивается и уносится потоком жидкости, а осевшая часть при колебаниях сползает и размывается потоком.

Частота колебаний тела обтекания зависит от противодействующего момента измерительного упругого элемента, состояния гидравлического тракта датчика и трубопровода, а также от характера потока жидкости.

Начало колебаний тела обтекания возникает при числах Рейнольдса

$$Re_1 = \frac{\sqrt{\frac{S_{ж.с}}{0,785}} v}{\nu} = 800 - 1500.$$

При верхнем диапазоне расхода и гидродинамическом давлении на тело обтекания $0,5 \div 1,5 \text{ кг}$ частота колебаний достигает 50 гц и выше.

Начало колебаний тела обтекания при измерении загрязненных жидкостей должно являться нижним пределом измерений датчика расхода.

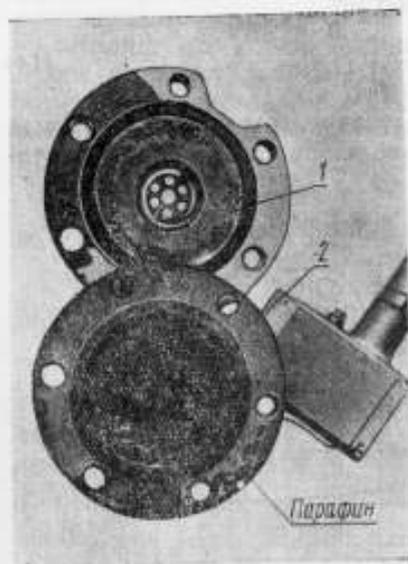


Рис. 4. Стенка запарафинивания трубопровода и датчика ДР-21:
1 — датчик расхода ДР-21; 2 — трубопровод в месте установки ДР-21.

Казанском филиале «ВНИИКАнефтегаз», имеет частичную гистерезисную компенсацию измерительного упругого элемента. Такая компенсация достигается предварительной закруткой обоих торсионов, при работе которых один торсион закручивается, другой раскручивается (компенсирует).

Процесс самоочистки тела обтекания проверен при работе датчиков на эксплуатационных скважинах нефтяного производственного управления (НПУ). Нефть содержит газ, воду, смолистые вещества, грязь и парафин. Датчики расхода были установлены до и после трапа. Через 5000 ч работы датчиков оседания парафина и механических примесей на теле обтекания не наблюдалось.

Для сравнения на рис. 4 показана степень запарафинивания трубопровода в месте установки датчика после 2000 ч работы. Толщина парафина, осевшего на стенку трубопровода, составляла $20-25 \text{ мм}$, а тело обтекания датчика оставалось чистым.

Оседание парафина в месте установки датчика расхода предотвращается остеклованием или покрытием специальными смолами участка трубопровода до и после установки датчика на длине $(30-50) D$.

Датчик расхода типа ДР-21 с телом обтекания, разработанный в

ТУРБИННЫЙ РАСХОДОМЕР

При измерении объемных расходов жидкостей турбинными расходомерами из-за непостоянства характера взаимодействия потока с лопастями ротора угловая скорость, по которой судят о расходе, не остается постоянной при изменении вязкости, турбулентности, профиля скорости и т. д. Так как эти параметры в большинстве случаев неизвестны, то скорость и расход потока определяются неточно. Нами разработано и внедрено устройство, позволяющее учесть изменение угловой скорости ротора турбинного расходомера при изменении характера потока путем установки за основной винтовой крыльчаткой второй, свободно насаженной на той же оси винтовой крыльчатки, на таком расстоянии от первой, при котором возмущение потока от первой осредняется по всему сечению, при-

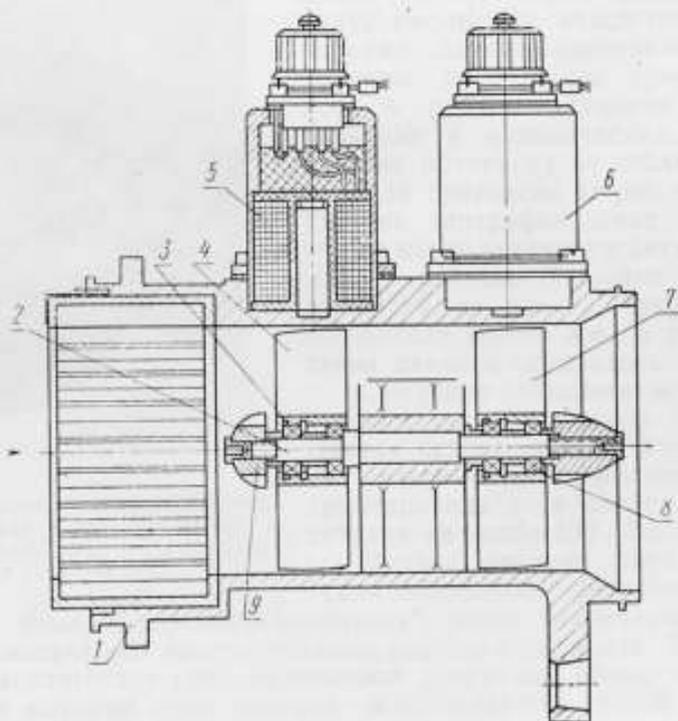


Схема турбинного расходомера.

чем шаг винтовых лопастей второй крыльчатки больше шага винтовых лопастей первой.

Как видим на рисунке, в корпусе 1 датчика расходомера на оси 2 в подшипниках 3 установлена винтовая крыльчатка 4. В магнитоиндукционном узле 5 генерируется сигнал, пропорциональный скорости вращения этой крыльчатки. На той же оси в подшипниках 8 расположена вторая винтовая крыльчатка 7 с шагом винтовых лопастей, большим шага винтовых лопастей первой крыльчатки. В магнитоиндукционном узле 6 генерируется сигнал, пропорциональный скорости вращения второй крыльчатки. Последняя находится непосредственно за первой в зоне осредненных возмущений (давлений) потока. Для улучшения структуры потока на входе установлен струенаправляющий аппарат 9. Использование вспомогательной крыльчатки с шагом, большим шага основной крыльчатки, позволяет по изменению отношения угловых скоростей основной и вспомогательной крыльчаток вносить поправку в замеренное число импульсов основной крыльчатки. При изменении только расхода угловые скорости обеих крыльчаток изменяются синхронно, и отношение скоростей остается постоянным. В случае изменения вязкости и характера турбулентности потока при постоянном расходе угловая скорость крыльчатки 4 меняется и при этом меняется закрутка потока. Угловая скорость второй крыльчатки меняется как под влиянием вязкости, так и под влиянием закрутки потока, созданной первой крыльчаткой. Шаг второй крыльчатки выбирается таким образом, чтобы изменение ее угловой скорости, вызванное изменением вязкости, характера турбулентности и т. д., было несоизмеримым с изменением угловой скорости от закрутки потока, образовавшейся за первой крыльчаткой. Поправка на изменение угловой скорости производится по изменению отношения числа импульсов.

Влияние закрутки потока от первой крыльчатки на вторую можно оценить по следующему уравнению:

$$m = \frac{k_{v_2}}{k_{v_1}} \cdot \frac{T_2}{T_1} \frac{1}{1 - \frac{k_{v_1}}{k_{v_2}} \frac{1}{(1 - k_p)} \left[k_{v_1}^2 + \frac{T_1^2}{4\pi^2 r_{cp}^2 \left(1 + \frac{8\pi r_{cp}}{c_y l b} \right) \right]} \frac{T_1 \cdot T_2}{4\pi^2 r_{cp}^2}}$$

где k_{v_2} — торможение второго колеса;
 T_1 — шаг винтовой линии первой по потоку крыльчатки;
 T_2 — шаг винтовой линии второй крыльчатки;
 r_{cp} — средний радиус крыльчатки;

$\bar{c}_y = \frac{dc_y}{dx}$ — коэффициент подъемной силы;

i — число лопастей крыльчатки;
 b — длина крыльчатки;

$k_{v_1} = 1 - \frac{\omega}{\omega_n}$ — торможение первого колеса;

ω_n — угловая скорость в идеальном потоке при $v \neq f(r)$

$$\text{или } \omega_n = \frac{2\pi v_{cp}}{T};$$

ω — текущая угловая скорость;

v — средняя скорость потока в лопаточном венце первого колеса.

Введение поправки производится по формуле:

$$k_v(1 - k_p) = k_3 \left(1 - \frac{1}{m} \cdot \frac{T_2}{T_1} \right) \left[\frac{4\pi^2 r_{cp}^2}{T_1 T_2} + \frac{T_1}{T_2} \left(1 + \frac{8\pi r_{cp}}{c_y \cdot b \cdot i} \right) \right].$$

Экспериментальная проверка показала удовлетворительное совпадение расчетных значений с опытными данными при введении поправочного коэффициента $k_3 \approx 0,3$, что, очевидно вызвано принятыми приближениями при выводе уравнений.

Учет закрутки произведен только для среднего радиуса, в то время как $m = \sum ti$.

Однако, несмотря на имеющиеся расхождения в расчетных данных с опытом, полученные уравнения могут быть уже в настоящее время использованы для качественных оценок функционирования расходомера. Последующие накопления опытных данных позволят уточнить методику учета поправки.

Г. П. КАТЫС, В. М. ИЛЬИНСКИЙ,
В. А. ОВЧАРОВ

МАССОВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ С ПРИТОРМОЖЕННЫМ ТЕЛОМ ВРАЩЕНИЯ

В большинстве массовых расходомеров применяются упругие элементы, которые обуславливают погрешности измерения, зависящие от нелинейности их характеристик, от изменения упругих свойств при изменении температуры и от упругого гистерезиса и последействия [1]. Последнее время наметилась тенденция разрабатывать массовые расходомеры без применения упругих элементов. В институте автоматики и телемеханики авторами разработан метод, описанный в работе [2], а также изготовлен и испытан массовый расходомер с гистерезисной муфтой, применяемой для торможения предварительно закрученного потока, которую с некоторыми допущениями можно назвать чувствительным элементом расходомера.

Сущность метода заключается в следующем. Если на пути закрученного потока поставить прямолопастную крыльчатку, свободно вращающуюся в подшипниках, но имеющую тормозное устройство типа гистерезисной муфты с постоянным моментом, независимо от угловой скорости, то крыльчатка будет уменьшать момент количества движения потока на постоянную величину. Зная угловую скорость входящего потока, можно записать

$$M_r = AG(\omega_1 - \omega_2) \frac{r_{\max}^2 + r_{\min}^2}{2} = \text{const}, \quad (1)$$

где M_r — момент гистерезисного тормоза;
 A — коэффициент, учитывающий распределение скоростей потока в каналах крыльчатки;
 G — массовый расход;
 ω_1 — угловая скорость потока, поступающего на чувствительную крыльчатку;
 ω_2 — угловая скорость чувствительной крыльчатки или угловая скорость потока при выходе из нее;
 r_{\max} и r_{\min} — соответственно максимальный и минимальный радиусы измерительной крыльчатки.

Тогда

$$\frac{1}{(\omega_1 - \omega_2)} = G \frac{r_{\max}^2 + r_{\min}^2}{2M_r} \cdot A \quad (2)$$

или период частоты T биения угловых скоростей входящего и выходящего с чувствительной крыльчатки потоков пропорционален массовому расходу:

$$T = G \frac{r_{\max}^2 + r_{\min}^2}{M_r z} A \cdot \pi, \quad (3)$$

где z — число лопастей крыльчатки.

Физическая сущность данного устройства заключается в том, что постоянный гистерезисный момент заставляет все время раскручивать предварительно закрученный поток. Причем при увеличении расхода, вследствие постоянства момента, это отставание становится все меньшим. Таким образом, верхним пределом этих устройств будет возможная для измерения величина разности генерируемых крыльчатками частот.

Поскольку вторая крыльчатка постоянно прикладывает к потоку момент, для работоспособности расходомера на нижнем пределе измерения требуется, чтобы в этом случае поток обладал уже каким-то моментом количества движения, большим, чем тормозной.

Для расходомеров, у которых перед подвижными крыльчатками установлен неподвижный шнек, формальный нижний предел получается следующим образом. Угловая скорость потока будет равна

$$\omega = \frac{2G \operatorname{tg} \alpha}{(r_{\max} + r_{\min}) \cdot \rho \cdot S_c}, \quad (4)$$

где ρ — плотность измеряемого потока;

α — угол атаки лопастей неподвижного шнека;

S_c — площадь проходного сечения шнека в нормальном сечении.

Приравняв гистерезисный момент к величине момента массового закрученного потока, получаем

$$M_r = \frac{G^2 \operatorname{tg} \alpha (r_{\max}^2 + r_{\min}^2)}{\rho (r_{\max} + r_{\min}) [(r_{\max}^2 - r_{\min}^2) - z d \frac{r_{\max} - r_{\min}}{\cos \alpha}]} \quad (5)$$

или

$$G_0 = \sqrt{\frac{M_r \cdot \rho (r_{\max}^2 - r_{\min}^2) \cdot \left[\pi (r_{\max} + r_{\min}) - \frac{2d}{\cos \alpha} \right]}{\operatorname{tg} \alpha (r_{\max}^2 + r_{\min}^2)}}, \quad (6)$$

где d — толщина лопасти в нормальном сечении.

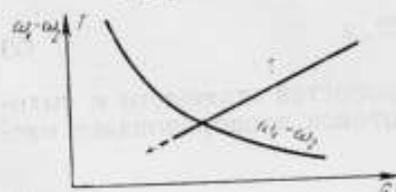
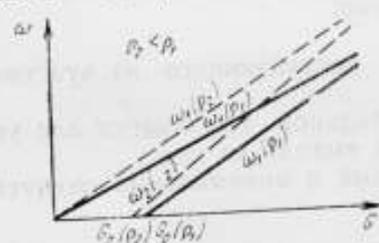


Рис. 1. Влияние плотности потока ρ на массовый расход.

На рис. 1 показано влияние изменения плотности потока на массовый расход G_0 . При уменьшении плотности и при тех же массовых расходах угловая скорость выходящего со шнека потока возрастает и, следовательно, при той же градуировочной характеристике расходомера, нижний предел расходомера уменьшается.

Для расходомеров, использующих рассматриваемый метод, когда закрутка потока осуществляется с постоянной угловой скоростью, выражение для G_0 не зависит от плотности потока и запишется:

$$G_0 = \frac{2M_r}{\omega (r_{\max}^2 + r_{\min}^2)}. \quad (7)$$

Запишем погрешность измерения максимального расхода, определяемую влиянием паразитных моментов:

$$\delta_r = \frac{\frac{G_{\max} \cdot A (r_{\max}^2 + r_{\min}^2)}{2(M_r + \Sigma M_n)} - \frac{G_{\max} \cdot A (r_{\max}^2 + r_{\min}^2)}{2M_r}}{\frac{G_{\max} \cdot A (r_{\max}^2 + r_{\min}^2)}{2M_r}} = \frac{M_r}{M_r + \Sigma M_n} - 1 = - \frac{\Sigma M_n}{M_r + \Sigma M_n}, \quad (8)$$

где ΣM_n — сумма паразитных моментов, действующих на заторможенную крыльчатку при G_{\max} и максимально возможных вязкостях измеряемого потока.

При рассмотрении лишь изменения градуировочной характеристики прибора и изменении вязкости потока выражение погрешности запишется:

$$\delta' = - \frac{\Sigma M'_n - \Sigma M_n}{M_r + \Sigma M_n - \Sigma M'_n}, \quad (9)$$

где $\Sigma M'_n$ — сумма паразитных моментов, действующих при минимальной вязкости измеряемого потока.

Сумму паразитных моментов можно записать:

$$\Sigma M'_n = \mu \omega \sum_p \frac{r_{\max, n}^2 \cdot S_{n, n}}{f_{2n}} + \frac{1}{2} \rho \omega_2^2 \sum_r G_{f_{1n}} \cdot r_{\max, n}^5 + \frac{1}{2} C_f \cdot \rho r_{\min}^5 (\omega_1 - \omega_2)^2, \quad (10)$$

где индекс p означает принадлежность параметра к рассматриваемой поверхности вращающейся конструкции второй приторможенной крыльчатки и ротора гистерезисного тормоза.

Коэффициент C_f является функцией числа Рейнольдса и имеет критическое значение $2 \cdot 10^4$. При $Re < 2 \cdot 10^4$ имеет место ламинарный режим:

$$C_f = \frac{\pi r_2}{Re \rho} + Re \left(\frac{f_2}{r_2} \right)^3 \left[0,0146 + \left(\frac{f_2}{r_2} \right)^2 \cdot 0,1256 \right]. \quad (11)$$

Для турбулентного режима $C_f = \frac{0,1311}{\sqrt[5]{Re}} P$, а в переходном режиме $C_f = \frac{1,334}{Re}$; C_f — относится к торцовому зазору между первой и второй крыльчатками.

μ — динамическая вязкость.

В первое слагаемое входят моменты сил вязкого трения наружных поверхностей, вращающейся крыльчатки и тормоза, второе — определяет моменты от сил вязкого трения торцовых поверхностей рассматриваемой конструкции, контактирующие с неподвижными внутренними поверхностями корпуса расходомера, а третье — определяет момент вязкого трения между первой и второй крыльчатками расходомера.

Приведенные выражения показывают, что влияние вязкости рассматриваемых приборов можно снизить до каких-то пределов кон-

струкции мерами при проектировании крыльчатки, а также путем увеличения момента гистерезисного тормоза M_r .

Последний вывод противоречит требованиям чувствительности этих расходомеров

$$S = \frac{A(r_{\max}^2 + r_{\min}^2)}{2M_r} \quad (12)$$

Это означает, что чувствительность массовых расходомеров с гистерезисной муфтой повышается с понижением тормозного гистерезисного момента.

Таким образом, мы получаем достаточно противоречивые требования, при которых повышать чувствительность можно лишь до пределов, когда влияние вязкости не будет меньше требуемой точности измерения массовых расходов потока с переменной вязкостью.

На рис. 2 показана конструкция испытываемого расходомера, в корпусе 2 которого по потоку расположен неподвижный шнек 1, прямолинейная свободно вращающаяся крыльчатка 3, прямолинейная крыльчатка 4, притормаживаемая гистерезисным устройством 5 (ротор двигателя Г-33). На корпусе расположены магнитоиндукционные узлы 6 и 7.

Испытания расходомера производились на расходомерной установке Института автоматики и телемеханики. Обороты крыльчаток измерялись с помощью частотомера класса 0,5. Статор тормоза питался от универсального источника питания УИП-1.

На рис. 3 показана тарировочная характеристика этого расходомера при токах, потребляемых гистерезисной муфтой, 400 и 600 ма.

Отличие экспериментальных характеристик от расчетных объясняется недостаточной точностью учета моментов от сил вязкого трения.

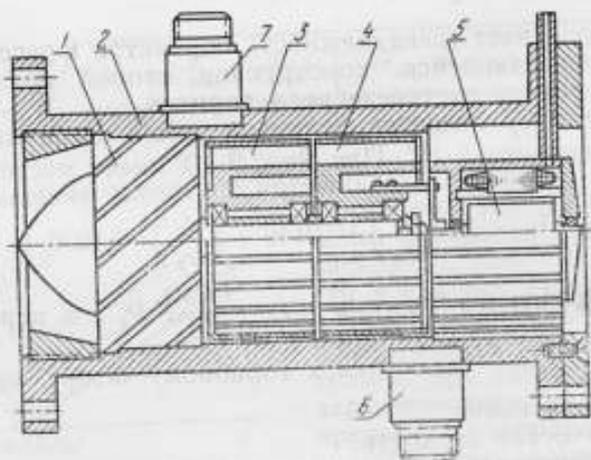


Рис. 2. Схема испытываемого расходомера.

Характеристики показывают, что наибольшая приведенная погрешность измерения расхода не превышает 0,7%.

На рис. 4 приведен шариковый массовый расходомер, реализующий рассматриваемый метод, в котором шарик 1 вращается свободно, второй шарик 3 притормаживается с постоянным моментом M_r магнитным устройством 4.

Торможение шарика вызывает некоторую раскрутку потока и период T частоты биений двух частот f_1 и f_2 , генерируемых шариками в магнитоиндукционных генераторах 2 и 5, будет пропорционален величине массового расхода

$$G = K \frac{1}{\omega_1 - \omega_2} = K_2 \frac{1}{f_1 - f_2} = K_2 T, \quad \text{сек} \quad (13)$$

где

$$K_2 = \frac{k}{2\pi \cdot n};$$

n — число зубьев звездочки магнитоиндукционного генератора;
 K — коэффициент пропорциональности.

При измерении больших расходов постоянный момент может оказаться недостаточным для получения необходимой чувствительности. В этом случае возможно применение компенсационной схемы измерения в предлагаемых датчиках, т. е.

$$G = K_3 \cdot M_T \cdot T, \quad (14)$$

где K_3 и T — постоянные величины.

Можно утверждать, что при постоянном периоде биений частот f_1 и f_2 , T — величина тормозного момента M_T , будет пропорциональна массовому расходу.

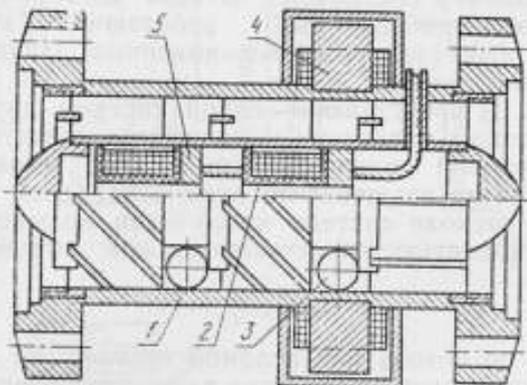


Рис. 4. Схема шарикового массового расходомера.

Реализация выведенной зависимости возможна при применении управляющей схемы „у“, которая регулирует потребляемый ток тормозной системы в зависимости от измерения периода биений частот, генерируемых в магнитоиндукционных узлах.

Величина потребляемого тока будет мерой массового расхода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Катус Г. П. Системы автоматического контроля полей скоростей и расходов. М., „Наука“, 1965.
2. Катус Г. П., Ильинский В. М. Способ измерения массового расхода жидкости или газа. Авторское свидетельство СССР, № 160600. „Бюллетень изобретений“, № 3. 1964.

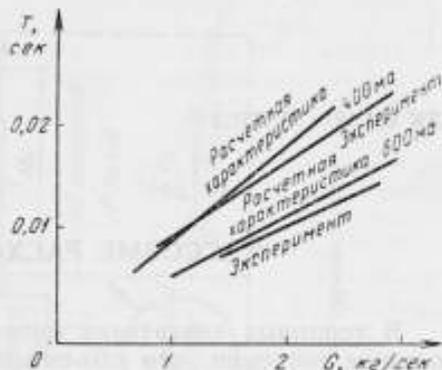


Рис. 3. Тарировочные характеристики расходомера.

МАССОВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ ТОПЛИВА

В тепловых двигателях массовый расход топлива имеет гораздо большее значение, чем объемный, поскольку он определяет основные параметры двигателя. В связи с этим машиностроительная промышленность одна из первых стала применять массовые расходомеры, которые непосредственно измеряют массовый расход без каких-либо дополнительных датчиков и корректирующих схем. Наиболее перспективными из всех типов массовых расходомеров с точки зрения точности, динамических качеств, габаритов, особенно при измерении больших расходов, являются турборасходомеры с приводом крыльчаток от потока измеряемой среды.

Для дистанционного измерения расходов топлива нами были разработаны два массовых расходомера на номинальные расходы 200 и 450 кг/сек. Расходомер состоит из датчика массового расходомера ДМР и вторичного прибора ПМР-1, работающего в комплекте с автоматическим дешифратором расходомерных данных АДР-2 или шлейфовым осциллографом.

Датчик (рис. 1) представляет собой систему двух спиральных крыльчаток, имеющих различные углы наклона лопастей и связанных между собой винтовой пружиной. Крыльчатки установлены в корпусе и приводятся во вращение потоком измеряемой жидкости. При установившемся расходе система крыльчаток вращается с постоянной угловой скоростью, пропорциональной объемному расходу жидкости:

$$\omega = k_1 Q. \quad (1)$$

Шаг первой по потоку или ведомой крыльчатки Z больше шага ведущей, вследствие чего между ними возникает геометрический угол сдвига, причем вторая крыльчатка при вращении опережает первую. Угол сдвига между крыльчатками φ , зависящий от момента на пружине и от жесткости пружины, пропорционален кинетической энергии потока [1], то есть:

$$\varphi = k_2 \rho Q^2, \quad (2)$$

где k_1, k_2 — постоянные коэффициенты.

Отношение угла φ к угловой скорости ω , численно равное фазовому углу сдвига Δt между крыльчатками, определяет собой массовый расход. Из формул (1) и (2) имеем

$$\Delta t = \frac{\varphi}{\omega} = \frac{k_2 \rho Q^2}{k_1 Q} = k \rho Q. \quad (3)$$

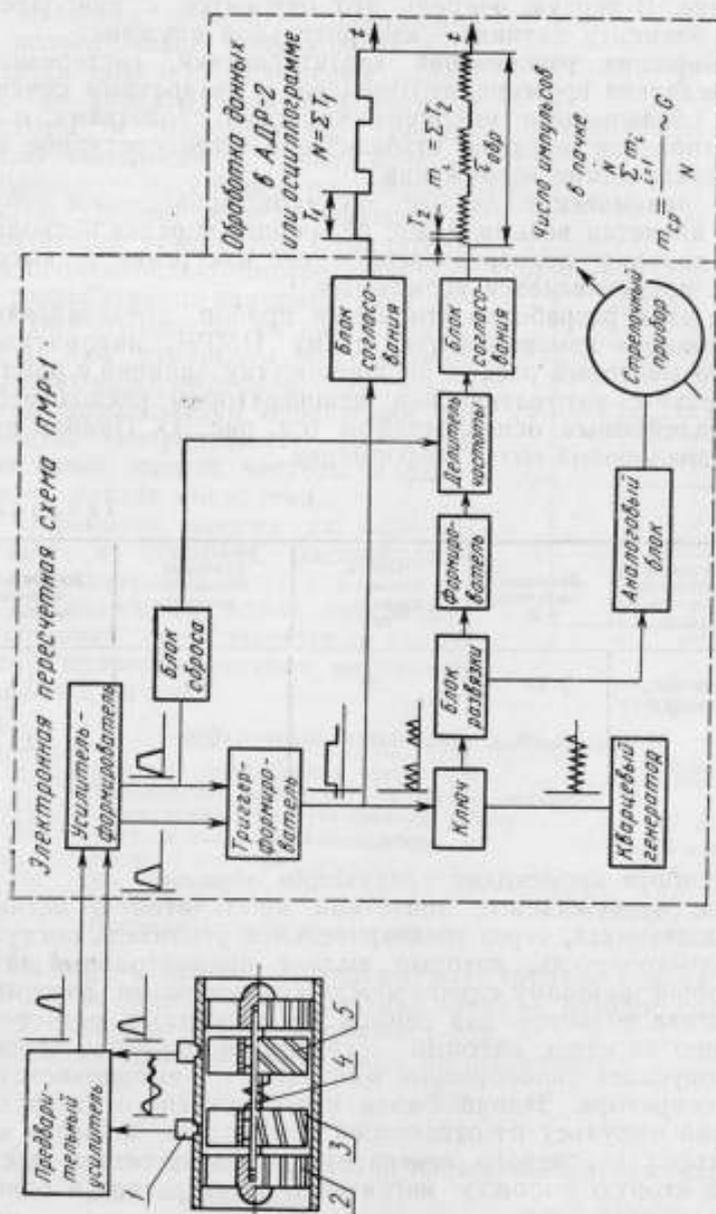


Рис. 1. Принципиальная схема датчика:
 1 — магнитно-индукционный узел; 2 — струйный элемент; 3 — щелевой сердечник; 4 — пружина; 5 — воздушный зазор.

Датчиком величина Δt выдается в виде фазового сдвига между импульсами, возбуждаемыми в магнитно-индукционных узлах I лопастями ведущей и ведомой крыльчаток. При разработке датчиков было уделено внимание конструктивным, технологическим и эксплуатационным факторам, повышающим точность и линейность характеристики датчика. В первую очередь это относится к наиболее ответственному элементу датчика — измерительной пружине.

Для уменьшения рассеивания характеристики, гистерезиса и упругого последствия пружина изготовлена с квадратным сечением из материала, обладающего высокими упругими свойствами; в процессе ее изготовления введена стабилизация — температурное заневоливание и циклические нагружения.

Основные технические данные датчиков приведены в табл. 1.

Время Δt является весьма малой величиной порядка нескольких миллисекунд, поэтому непосредственное его измерение с высокой точностью не представляется возможным.

В связи с этим разработан вторичный прибор, представляющий собой электронную измерительную схему ПМР-1, автоматически определяющую массовый расход по промежутку времени и работающую в комплекте с автоматическим дешифратором расходомерных данных и со шлейфовым осциллографом (см. рис. 1). Прибор имеет дискретный и аналоговый выход информации.

Таблица 1

Тип датчика	Диапазон измерения расхода, кг/сек	Давление жидкости, кг/м ²	Частота выходного сигнала, гц	Условный проходной диаметр, мм	Точность измерения расхода, %
ДМР-200	от 40 до 200	$5 \cdot 10^6$	60	200	± 1
ДМР-450	от 80 до 450	$5 \cdot 10^6$	60	250	± 1

Работа прибора происходит следующим образом.

Импульсы, возбуждаемые лопастями крыльчаток в магнитно-индукционных датчиках, через предварительный усилитель поступают на триггер-формирователь, который выдает прямоугольный сигнал, соответствующий фазовому сдвигу между крыльчатками. Этот низкочастотный сигнал подается для записи на магнитный регистратор и одновременно на ключ, который открывается передним фронтом сигнала и пропускает пилообразные импульсы от высокочастотного кварцевого генератора. Задний фронт низкочастотного сигнала, соответствующий импульсу от отстающей крыльчатки, запирает ключ. Пачки импульсов кварцевого генератора через делитель частоты поступают на вторую дорожку магнитного регистратора и одновременно на аналоговый блок.

Блок сброса обеспечивает приведение делителя частоты в исходное состояние для приема очередной пачки импульсов.

Таким образом, на выходе из дискретного блока имеются две последовательности электрических импульсов: низкочастотная, соответствующая числу пачек кварцевого генератора, и высокочастотная, соответствующая заполняющей частоте кварцевого генератора.

Дальнейшая обработка полученных данных производится в арифметическом устройстве (АДР) в режиме „соотношение“. При этом по низкочастотному каналу формируется интервал обработки, состоящий из целого числа периодов. В АДР ведется подсчет всех целых периодов по каналам низкой и высокой частоты и определяется среднее число импульсов в пачке, пропорциональное массовому расходу (см. рис. 1). Данные расчета выдаются на печатающее устройство. Отличительной особенностью дискретного блока разработанной измерительной схемы ПМР-1 является ее высокая точность при измерении нестационарных потоков жидкости, так как в схеме используется осреднение количества кварцованных импульсов всех пачек низкой частоты в заданном интервале обработки.

Обработка данных на АДР облегчает и ускоряет расшифровку данных измерения.

В аналоговом блоке дискретная информация преобразуется в напряжение, пропорциональное числу импульсов в пачке.

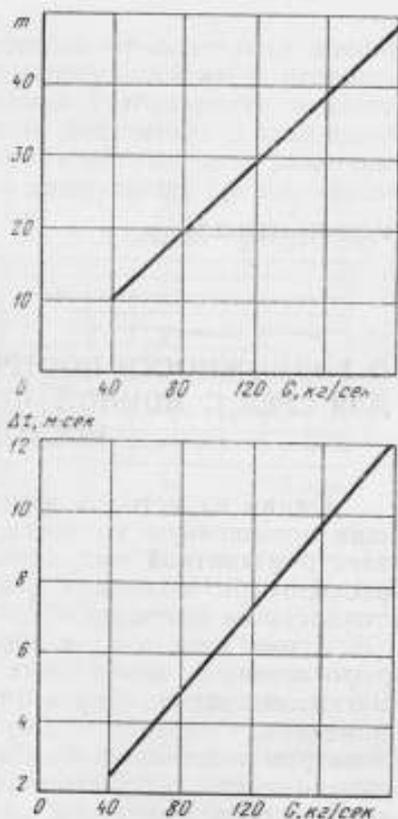


Рис. 2. Градуировочные характеристики расходомера.

Основные технические данные ПМР-1

Пределы регистрируемых частот	3—100 гц
Наименьшая амплитуда сигнала с датчика, обеспечивающая устойчивую работу	10 мв
Частота кварцевого генератора	60 кгц
Питание прибора	220 в, 50 гц
Вес прибора	6,5 кг
Габариты	360×200×240
Погрешность измерения времени	±0,126%

На рис. 2 даны градуировочные характеристики расходомера ДМР-200 на воде. Характеристика линейна, разброс показаний в диапазоне расходов 5:1 не превышает 1%.

Фазовый сдвиг Δt определяем по формуле

$$\Delta t = \frac{m_{cp}}{f_{кв}}, \quad (4)$$

где $f_{кв}$ — заполняющая частота, пропорциональная частоте кварцевого генератора;

m_{cp} — среднее число импульсов в пачке.

Разработанные расходомеры могут быть использованы и в других отраслях техники, где требуется измерение массового расхода, приготовление смесей точных доз различных жидкостей, управление аппаратурой, регулирующей подачу жидкостей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Катус Г. П. Системы автоматического контроля полей скоростей и расходов. М., „Наука“, 1965.

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МАГНИТНОГО РАСХОДОМЕРА ДЛЯ СРЕД С ИОННОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ И ВОЗБУЖДЕНИЕМ ПОСТОЯННЫМ МАГНИТОМ

Одним из методов измерения расхода жидкости, обеспечивающим повышенную точность, является метод, основанный на явлении электромагнитной индукции. В последние годы электромагнитные расходомеры получают все большее распространение, однако их точность не превышает 1,5—3%.

Кроме того, для их поверки не существует эффективных и недорогостоящих поверочных средств. Низкий класс точности электромагнитных расходомеров определяется в основном разнообразными помехами. Особенно подвержены помехам приборы с переменным электромагнитным возбуждением. К ним можно отнести помехи, вызываемые трансформаторным эффектом, токами утечки из обмотки возбуждения, емкостной нагрузкой линии связи, поляризационными явлениями на границе «электрод — жидкость» и т. д.

Особые трудности вызывает наличие помех, связанных с трансформаторным эффектом и токами утечки из обмотки возбуждения. По данным [1], трансформаторные помехи могут достигать 250 мкВ в приборах калибром до 50 мм. В работе [2] показано, что сопротивление утечки в 1000 мгом или емкость всего лишь в 3 пкФ резистивно-емкостной связи между обмоткой возбуждения и электродами может вызвать помеху до $5 \cdot 10^{-3}$ в, что совершенно недопустимо. Токи утечки имеют активную и емкостную составляющие, и вносимые ими помехи имеют неопределенную фазу, что затрудняет, а подчас и делает невозможным полное отделение от них полезного сигнала. Особенно неприятна емкостная составляющая, фаза которой может совпадать с фазой полезного сигнала. В этом смысле для возбуждения было бы целесообразно применять постоянный магнит. Такой преобразователь был бы свободен от всех перечисленных помех, кроме помех электрохимического происхождения. Однако, если преобразователь поставить в режим микротоков и использовать специальные электроды, поляризационные явления могут быть исключены либо сведены к минимуму. Стабильность разности потенциалов таких электродов тоже оказывается высокой.

Для изучения вопросов стабильности разности электродных потенциалов и поляризации электродов при малых постоянных токах были проведены предварительные электрохимические исследования. В электрохимии в качестве обратимых чаще всего используются следующие электроды:

$Cd/CdSO_4$, $Zn/ZnSO_4$, $Ag/AgNO_3$ — обратимые относительно катиона,

Ag/AgCl/KCl, Hg/Hg₂Cl₂/KCl — обратимые относительно аниона. В магнитной расходомерии, по-видимому, надежнее использовать обратимые электроды для достижения стабильности разности электродных потенциалов и динамического состояния. С этой целью проведены измерения разности электродных потенциалов различных электродных пар в разных покоящихся и движущихся средах. Иссле-



Рис. 1. Дрейф разности потенциалов каломельных электродов.

довалась пара платинированных платиновых электродов в растворах 0,04 N KOH, 0,1 N KOH, 0,2 N KOH, 0,1 N KCl, 0,04 N HCl, 0,1 N HCl, 0,2 N HCl; пара кадмиевых электродов в 1,0 N растворе CdSO₄; пара цинковых поликристаллических электродов в 1,0 N растворе ZnSO₄; пара цинковых монокристаллических электродов в насыщенном растворе KCl; пара каломельных электродов в насыщенном растворе KCl.

Измерения показали, что наибольшей стабильностью обладают каломельные электроды, разность собственных потенциалов которых, достигающая иногда $2,6 \cdot 10^{-4}$ в, остается практически постоянной в течение длительного времени. Замеченный максимальный дрейф разности электродных потенциалов каломельных электродов составил $6 \cdot 10^{-6}$ в (рис. 1). При величине возможного полезного сигнала в $5 \cdot 10^{-3}$ — $7 \cdot 10^{-3}$ в дрейф разности электродных потенциалов составляет 0,1%, что можно считать приемлемым соотношением. Разность потенциалов других электродных пар оказалась весьма неустойчивой и значительной по величине, что делает невозможным применение их в точном измерении расхода.

Необходимо отметить, что в работе [3] приведены результаты подобных исследований. На стабильность собственной разности потенциалов были исследованы различные электроды. Наилучшие результаты также были получены с каломельными электродами, однако дрейф их составил $0,1 \cdot 10^{-3}$ в. Такой дрейф, видимо, объясняется тем, что были использованы растворы различные по природе и концентрации. В нашем случае применяемые растворы были одинаковыми и по природе, и по концентрации.

При поляризации электродов постоянным током возможно появление противо-э. д. с. за счет химической и концентрационной поляризации. Величина противо-э. д. с. может быть довольно значительной и достигать того же порядка, что и э. д. с. поля-

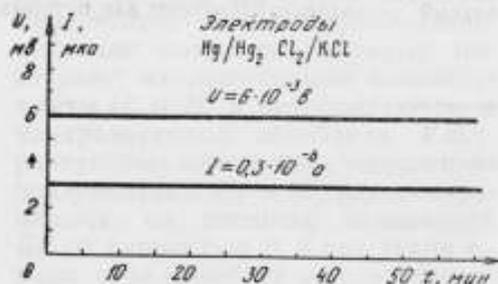


Рис. 2. Кривые поляризации электродов.

ризации. В связи с этим было необходимо установить, меняется ли во времени разность потенциалов двух каломельных электродов при поляризации их малым постоянным током. Измерения показали, что при поляризации двух каломельных электродов постоянным током до $0,3 \cdot 10^{-6}$ а, разность их потенциалов сохраняется постоянной в течение длительного времени (рис. 2). Величина тока в поляризующей цепи также оставалась постоянной. Это означает, по-видимому, что каломельные электроды при малых постоянных токах не подвержены ни химической, ни концентрационной поляризации.

Аналогичные работы проводились и другими авторами. Так, в [4] исследованы электроды типа Cd/CdSO₄, отделенные от рабочей среды пористыми перегородками. Измерение разности потенциалов электродов показало, что она сохраняет постоянное значение, а поляризационные изменения на электродах отсутствуют при токе, равном $0,05 \cdot 10^{-6}$ а. Зависимость силы тока от напряжения, снятая в интервале от 0 до $1,5 \cdot 10^{-6}$ а, достаточно точно подчинялась закону Ома.

В работе [5] исследовались золотые электроды значительной площади в 0,1% растворах NaCl и KCl. Как отмечают авторы, расходомер с золотыми электродами надежно, без всплесков сигнала и смещения нулевой линии измерял скорость потока до 30 м/сек.

Результаты данной работы и ряда других дают основание надеяться на возможность разработки магнитного расходомера повышенной точности с постоянным возбуждением для сред с ионной проводимостью. Предполагается, что этот расходомер может быть применен для поверки (градуировки) электромагнитных и других расходомеров в лабораторных условиях. Кроме того, такой расходомер, обладая высокими динамическими свойствами, оказался бы годным для точных измерений мгновенного значения быстроменяющегося расхода жидкости — важного параметра при исследовании пульсаций в гидросистемах и камерах сгорания двигателей.

Авторы считают, что полученные результаты предварительных исследований ни в коей мере нельзя считать окончательными. Необходимо провести дальнейшие исследования в различных магнитных полях при различных числах Re.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корсунский Л. М. Электромагнитные гидрометрические приборы. М., Изд-во стандартов, 1964.
2. С. Hitchcock I. C. Electrical Characteristics of the Magnetic Flow Detector Head. „Instrument Engineer“, April 1964.
3. Корсунский Л. М. Исследование электромагнитного метода измерения расхода. Диссертация. Харьков, 1962.
4. Жилкин Б. Д. „Авиационная техника“, 1958, № 3.
5. Усовершенствованный электромагнитный расходомер. „Приборы для научных исследований“, 1967, № 1.

Н. И. БРАЖНИКОВ, О. С. ВАВИЛОВ,
А. С. ОГАНЕСОВ

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДВУХКАНАЛЬНЫЙ ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ СКОРОСТИ ПОТОКА ЖИДКОСТИ

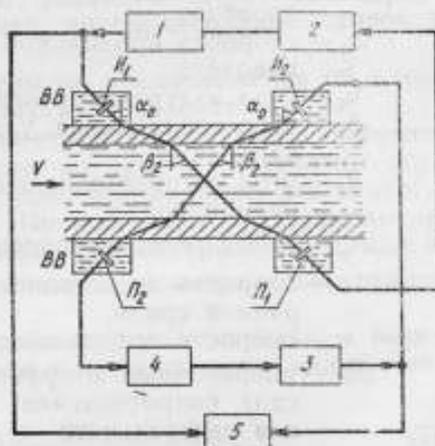
В последнее время значительное распространение получили ультразвуковые частотно-импульсные методы контроля скорости потока [1—5]. Наибольший интерес представляет применение этих методов для бесконтактного контроля скорости потока чистых, неоднородных, а также неэлектропроводных жидкостей. Бесконтактный контроль скорости потока [1] определяется одновременным выполнением следующих двух требований:

- а) отсутствие соприкосновения пьезоэлементов с контролируемой средой;
- б) отсутствие нарушений потока контролируемой среды как по форме, так и по направлению.

В частотно-импульсных ультразвуковых устройствах контроля скорости потока жидкости мерой расхода является разность частот автоциркуляции импульсов в замкнутой электроакустической цепи при распространении ультразвуковых импульсов по направлению потока и против него.

При бесконтактном контроле автоциркуляция обеспечивается следующим образом.

На трубопроводе во внешних волноводах $ВВ$ (см. рисунок) установлены излучающие ($И_1, И_2$) и приемные ($П_1, П_2$) пьезоэлементы. Генераторы 1, 3 вырабатывают короткие импульсы, которые поступают на излучающие пьезоэлементы $И_1$ и $И_2$ и преобразуются в ультразвуковые колебания. Ультразвуковые волны, излучаемые пьезоэлементами $И_1$ и $И_2$, распространяются во внешних волноводах $ВВ$ со скоростью c_1 и под углом α_0 . Если угол α_0 выбран между первым и вторым критическими углами [6], то в стенке трубопровода распро-



Блок-схема ультразвукового частотно-импульсного расходомера.

страняются только поперечные волны со скоростью c_2 . В контролируемой среде этих волны трансформируются в продольные, распространяющиеся под углом β_2 со скоростью c .

Прошедшие через волноводы, трубопровод и контролируемую среду ультразвуковые волны поступают на пьезоэлементы Π_1 и Π_2 , преобразующие их в электрические сигналы, которые после усиления в усилительных блоках 2, 4 вновь запускают генераторы 1, 3.

Таким образом, генераторы вырабатывают каждый импульс только после приема предыдущего импульса, время распространения которого от излучателя до приемника зависит от скорости потока контролируемой среды.

В каждой замкнутой электроакустической цепи при этом устанавливается частота следования импульсов, зависящая от скорости потока, которая после преобразований поступает на измерительный прибор 5, отградуированный в единицах скорости потока.

Время прохождения ультразвуковой волной пути от излучателя к приемнику определяется выражениями [7]:
по потоку —

$$\tau_{1-1} = \tau - \frac{2R \operatorname{tg} \beta_2}{c^2} B_{\text{ар}} v, \quad (1)$$

против потока —

$$\tau_{2-2} = \tau + \frac{2R \operatorname{tg} \beta_2}{c^2} B_{\text{ар}} v, \quad (2)$$

где

$$\tau = \frac{2R}{c \cdot \cos \beta_2} + \frac{2(R_1 - R)}{c_2 \cdot \cos \beta_1} + \frac{2(H_0 - R_1)}{c_1 \cdot \cos \alpha_0} + 2\tau_{\text{м}}; \quad (2a)$$

τ — полное время распространения ультразвуковой волны от излучающего до приемного пьезоэлемента при отсутствии движения потока ($v = 0$);

$2R_1, 2R_2$ — внешний и внутренний диаметры трубопровода;

$2H_0$ — проекция пути, проходимого ультразвуковой волной, на нормаль к оси трубопровода;

c_2 — скорость поперечной волны ультразвука в стенке трубопровода;

c_1 — скорость продольной волны ультразвука во внешних волноводах;

α_0 — угол излучения ультразвука;

β_1 — угол преломления ультразвуковой волны в стенке трубопровода;

β_2 — угол распространения ультразвуковой волны в контролируемой среде;

$2\tau_{\text{м}}$ — время распространения в мембранах;

c — скорость продольной ультразвуковой волны в контролируемой среде;

v — скорость потока контролируемой среды;

$B_{\text{ар}}$ — поправочный коэффициент, учитывающий гидродинамическое сопротивление λ' трубопровода [7], определяемый для центрального и субцентрального лучей выражением

$$B_{\text{ар}} = 1 + 0,625 \sqrt{\frac{\lambda'}{2}}.$$

Частоты следования импульсов в замкнутых электроакустических цепях получаются соответственно:

$$F_1 = \frac{1}{\tau_{1-1} + \tau_{эа}} = \frac{1}{\tau + \tau_{эа} - \frac{2R \operatorname{tg} \beta_2}{c^2} B_{ар} v}, \quad (3)$$

$$F_2 = \frac{1}{\tau_{2-2} + \tau_{эа}} = \frac{1}{\tau + \tau_{эа} + \frac{2R \operatorname{tg} \beta_2}{c^2} B_{ар} v}, \quad (4)$$

где $\tau_{эа}$ — временная задержка, вносимая электронной схемой.

Разность же частот, регистрируемая измерительным прибором δ , равна:

$$\Delta F = F_1 - F_2. \quad (5)$$

Подставляя выражения (3) и (4) в (5), после преобразований получим

$$\Delta F_u = \frac{4R \operatorname{tg} \beta_2 B_{ар} v}{c^2 (\tau + \tau_{эа})^2 - \frac{4R^2 \operatorname{tg}^2 \beta_2}{c^2} B_{ар}^2 v^2}. \quad (5a)$$

Отбрасывая малый член (вычитаемое) в знаменателе, выражение (5a) можно записать в виде:

$$\Delta F = \frac{4R \operatorname{tg} \beta_2}{c^2 (\tau + \tau_{эа})^2} B_{ар} v \quad (6)$$

или

$$\Delta F = \frac{\sin 2\beta_2}{2R \left(1 + \frac{\tau_3}{\tau_1}\right)^2} B_{ар} v, \quad (6a)$$

где

$$\tau_1 = \frac{2R}{c \cdot \cos \beta_2},$$

$$\tau_3 = \frac{2(R_1 - R)}{c_2 \cdot \cos \beta_1} + \frac{2(H_0 - R_1)}{c_1 \cdot \cos \alpha_0} + 2\tau_{эа} + \tau_{эа}.$$

Как видно из выражений (6), (6a), разность частот автоциркуляции в электроакустических каналах пропорциональна скорости потока.

Выражения (5a), (6) и (6a) получены из предположения об идентичности обоих каналов измерительного преобразователя.

Очевидно, что идентичность параметров обоих каналов не может быть обеспечена. Существуют причины, которые не позволяют осуществить на практике идеальные условия, необходимые для точного выполнения соотношений (5a) и (6a). Прежде всего — это различия $2\delta\tau_3$ во временной задержке $\tau_{эа}$, вносимой электронной схемой и мембранами преобразователя, и асимметрия геометрических размеров $2\delta R$, $2\delta(R_1 - R)$, $2(H_0 - R_1)$.

Вводя члены, соответствующие асимметрии в каналах, в выражения (2) и (2a), после преобразования и отбрасывания малых членов, получим

$$\Delta F_p = \left(1 + \frac{\delta R}{R}\right) \left(1 - \frac{\delta\tau_3}{\tau_2}\right) \frac{A_1 v}{\left(1 + \frac{\tau_3}{\tau_1}\right)^2} + \frac{\delta\tau_3}{\tau_1^2}, \quad (7)$$

где

$$A_1 = \frac{\sin 2\beta_2}{2R} B_{\text{от}},$$

$$\tau_2 = \tau_1 + \tau_3,$$

$$\delta\tau_2 = \frac{2\delta R}{c \cdot \cos \beta_2} + \frac{2\delta(R_1 - R)}{c_2 \cdot \cos \beta_1} + \frac{2\delta(H_0 - R_1)}{c_1 \cdot \cos \alpha_0} + 2\delta\tau_3.$$

Из сравнения идеальной (5а) и реальной (7) характеристик видно, что имеют место два вида погрешностей:

а) дрейф нуля (параллельное смещение идеальной характеристики), выражающееся добавлением к функции (5а) постоянного слагаемого

$$\delta F_0 = \frac{\delta\tau_2}{\tau_2^2}, \quad (8)$$

б) изменение крутизны характеристики, что соответствует появлению в функции (5а) дополнительного множителя

$$k = \left(1 + \frac{\delta R}{R}\right) \left(1 - \frac{\delta\tau_2}{\tau_2}\right). \quad (9)$$

Погрешности, вызванные начальной асимметрией, можно значительно уменьшить, применив итерационный метод регулировки [4, 8]. Кроме того, значения обеих погрешностей, вносимых асимметрией, с увеличением диаметра трубопровода, уменьшаются.

Продифференцировав уравнение (7) по t , получим следующее аналитическое выражение для температурной погрешности:

$$\Delta F_t = \left[\left[\frac{\partial A_1}{\partial t} \left(1 - \frac{\delta\tau_2}{\tau_2}\right) - A_1 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\delta\tau_2}{\tau_2}\right) - \right. \right. \\ \left. \left. - 2A_1 \frac{\left(1 - \frac{\delta\tau_2}{\tau_2}\right)}{\left(1 - \frac{\tau_3}{\tau_1}\right)} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\tau_3}{\tau_1}\right) \right] \frac{\left(1 + \frac{\delta R}{R}\right)}{\left(1 - \frac{\tau_3}{\tau_1}\right)^2} v + \frac{1}{\tau_2^2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\delta\tau_2) - 2 \frac{\delta\tau_2}{\tau_2} \frac{\partial \tau_2}{\partial t} \right] \right] \Delta t, \quad (10)$$

где Δt — изменение аргумента (температуры).

Полное выражение для температурной погрешности не приводится ввиду его громоздкости.

Как видно из выражений (5а), (7) и (10), разность частот ΔF автоциркуляции импульсов в замкнутых электроакустических цепях зависит от скоростей ультразвука в потоке C и волноводе c_1 , а также от угла β_2 , под которым волна распространяется в контролируемой жидкости. Анализ показывает, что возможен такой подбор относительного температурного коэффициента b'_1 скорости ультразвука в волноводе, что температурные изменения c_1 , $\cos \beta_1$, $\cos \beta_2$ будут компенсировать влияние температурных изменений скорости ультразвука в жидкости на значение ΔF . Для обеспечения компенсации должны выполняться условия

$$\frac{1}{c} \frac{dc}{dt} + \frac{1}{c_1} \frac{dc_1}{dt} \quad (11)$$

и

$$\frac{\left[\frac{2(R_1 - R)}{\cos \beta_1} + c_2 \tau_{2a} \right]}{\left[\frac{2(R_1 - R)}{\cos \beta_1} + 2c_2 \tau_m \right]} = \frac{\frac{1}{c_2} \frac{dc_2}{dt}}{\frac{1}{c} \frac{dc}{dt}}. \quad (11a)$$

Первое — означает, что относительный температурный коэффициент b' скорости ультразвука в контролируемой жидкости должен быть равен относительному температурному коэффициенту b'_1 скорости ультразвука в волноводах.

Условие (11б) может быть выполнено путем подбора материала трубопровода с относительным температурным коэффициентом b'_2 скорости ультразвука, равным коэффициенту b' , а также регулировкой значения $\tau_{\text{за}}$.

При оптимальной конструкции преобразователя и электронной схемы, значения температурных погрешностей, вносимых начальной асимметрией в практических диапазонах, малы и ими можно пренебречь, не стремясь к выполнению условия (11б).

Известно [1, 7], что для исключения влияния двукратно отраженной волны на результат измерения амплитуда A_r реверберационной волны не должна превышать 0,01 амплитуды A_d прямой волны, т. е. должно выполняться неравенство

$$kDR_0 \leq 0,1, \quad (12)$$

где k — коэффициент, учитывающий затухание волны в средах преобразователя;

D — общий коэффициент пропускания волны по амплитуде;

R_0 — коэффициент отражения приемника (или излучателя), равный отношению амплитуд подающей на приемник (или излучатель) и отраженной от него волны.

При выполнении трубопровода измерительного преобразователя из материала, имеющего малый коэффициент пропускания D или большой коэффициент затухания k , влияние реверберации на точность измерений практически исключается.

Таким образом, при подборе материала трубопровода и внешних волноводов, одновременно удовлетворяющих условиям (11а) и (12), резко повышается по сравнению с существующими методами отношение сигнал/помеха на приемном пьезоэлементе, уменьшается температурная погрешность и увеличивается чувствительность расходомера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биргер Г. И., Бражников Н. И. Ультразвуковые расходомеры. М., «Металлургия», 1964.
2. Маки Yashimoto, Kazuyuki Ito. „Ultrasonic Flowmeter System“. Патент США, № 3237453, 24.08.62.
3. Шаfranовская З. М., Журавлев Л. И., Крысакова Е. С., Тимофеев Н. Ф., Шмаков Ю. И. Ультразвуковой расходомер. Авт. свид. СССР, № 191155, от 26.10.62.
4. Brown A. E. Dual Path Ultrasonic Measurement of Fluid Flow. RSI, 37, № 9, 1181—1186, 1966.
5. Журавлев Л. И. Способ исключения влияния паразитных отражений в акустических каналах частотно-импульсных ультразвуковых расходомеров. Авт. свид. СССР, № 157807, 1962.
6. Бражников Н. И. Способ ввода ультразвуковой волны в расходомере с жидкостным волноводом. Авт. свид. СССР, № 151053, 1960.
7. Бражников Н. И. Ультразвуковая фазометрия. М., «Энергия», 1968.
8. Бражников Н. И. Ультразвуковой расходомер. Авт. свид. СССР, № 210402, 1968.

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПОТОКА ЖИДКОСТЕЙ ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА (ЯМР)

К настоящему времени создано несколько типов ЯМР расходомеров [1, 2, 3, 4], которые обладают такими ценными свойствами, как бесконтактность измерений, отсутствие дополнительных потерь давления, большое разнообразие жидкостей.

В данной работе рассматривается новый тип ЯМР расходомера, который является простым в исполнении, эксплуатации и исключает источник погрешностей, связанный с изменением "эффективной длины" мерного участка. Блок-схема устройства дана на рис. 1. Жидкость, поляризованная в поле магнита 2, поступает по трубопроводу из немагнитного диэлектрического материала 1 в магнитное поле анализатора 3, в котором расположены катушка нутации 4 и приемная катушка 5. На катушки 4 и 5 с блока таймера 6 и радиочастот-

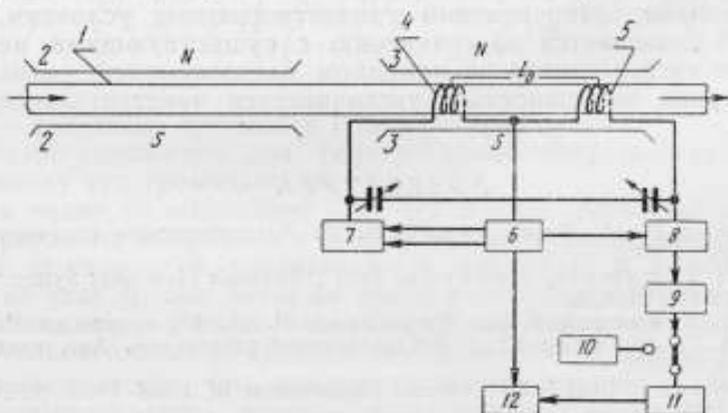


Рис. 1. Блок-схема устройства.

ного генератора 7 подаются два радиочастотных импульса, период следования которых и интервал между импульсами регулируются. Генератор 7, построенный по схеме ударного возбуждения контура, настроен на резонансную частоту

$$\nu_0 = \frac{\gamma}{2\pi} H_0,$$

где γ — гидромагнитное отношение ядра;
 H_0 — напряженность магнитного поля.

Радиочастотные импульсы удовлетворяют условию $\gamma H_1 \tau_n = \frac{\pi}{2}$,

где H_1 — напряженность радиочастотного поля;
 τ_n — длительность импульса.

После каждого импульса в резонансных условиях наблюдается сигнал свободной индукции, который подается через приемник сигналов 8 и усилитель 9 на осциллограф 10 либо на устройство сравнения 11.

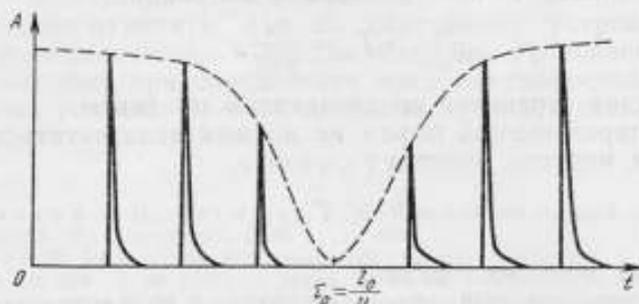


Рис. 2. Зависимость амплитуды сигнала от интервала.

Если интервал между импульсами τ_0 равен времени прохождения меченого участка жидкости между катушками, то в момент действия второго импульса в объеме катушки 5 будет находиться жидкость с инвертированными ядерными моментами, что даст минимальную амплитуду сигнала свободной индукции после второго импульса (рис. 2). Интервал τ_0 определяется измерителем времени 12 (см. рис. 1). Минимум сигнала можно наблюдать визуально по осциллографу или определять с помощью устройства сравнения, которое вырабатывает импульс в момент минимума сигнала. По известному τ_0 и длине мерного участка определяют скорость движения жидкости и расход.

Верхний предел измеряемых скоростей определяется следующими факторами.

1. Время нахождения жидкости в поляризаторе должно быть достаточным для получения наиболее полной намагниченности [1]:

$$\frac{l_n}{v_{\max}} \geq 10 T_1 \text{ — для ламинарного течения;} \quad (1)$$

$$\frac{l_n}{v_{\max}} \geq T_1 \text{ — для турбулентного течения,}$$

где l_n — длина поляризующего участка трубопровода;

T_1 — время спин-решеточной релаксации жидкости;

v_{\max} — максимально возможная скорость жидкости.

2. Время нахождения в катушке нутации 4 должно быть больше длительности импульса:

$$\frac{l_n}{v_{\max}} > \tau_n. \quad (2)$$

где l_n — длина катушки нутации.

3. Время нахождения меченых ядер в приемной катушке должно быть больше длительности импульса плюс время продолжительности

сигнала свободной индукции, которое определяется неоднородностью поля:

$$\frac{l_a}{v_{\max}} > \tau_n + T_3 = \tau_n + \frac{2\pi}{\gamma\Delta H}, \quad (3)$$

где l_a — длина приемной катушки;

ΔH — неоднородность магнитного поля.

4. Время прохождения мерного участка должно быть больше продолжительности сигнала свободной индукции:

$$\frac{l_0}{v_{\max}} > T_3 = \frac{2\pi}{\gamma\Delta H}. \quad (4)$$

Нижний предел ограничен по следующим причинам.

1. Деполяризованный объем не должен намагнититься за время прохождения мерного участка

$$\frac{l_0}{v_{\min}} \ll T_1, \quad (5)$$

где l_0 — длина мерного участка.

2. Деполяризованный объем не должен размагнититься на свободном от магнитного поля участке между поляризатором и анализатором:

$$\frac{l_{n-n}}{v_{\min}} \ll T_1, \quad (6)$$

где l_{n-n} — длина участка трубопровода между магнитами.

Предлагаемый метод измерения расхода по сигналу свободной индукции исключает применение градиентных устройств, значительно снижает требования к стабильности выдерживания резонансных условий в объемах обеих катушек, так как короткий радиочастотный импульс имеет достаточно широкий спектр частот. Так, при частоте 10 мГц и длительности импульса 6 мксек имеем

$$\frac{1}{\tau_n} \cdot \frac{1}{\nu_0} = \frac{1}{6 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{1}{10^7} = 2\%,$$

что превышает сумму нестабильностей магнитного поля и частоты LC генератора. Кроме того, в данном методе исключается „плавание“ эффективной длины мерного участка, малое l_0 дает возможность измерять скорость жидкостей с короткими T_1 , амплитуда сигнала свободной индукции в некоторых случаях превышает величину сигналов поглощения или дисперсии и не зависит от релаксационных характеристик вещества.

Амплитуда A_0 определяется по формуле

$$A_0 = \frac{\pi^2 WSQN_0 \mu_0^2}{KT} \cdot H_0, \quad (7)$$

где ξ — коэффициент заполнения катушки;

W — число витков катушки;

S — площадь сечения;

Q — добротность контура;

N_0 — концентрация ядер;

μ_0 — магнитный момент ядра;

K — постоянная Больцмана;

T — температура образца.

По описанной блок-схеме был собран макет расходомера со следующими основными параметрами: напряженность поляризующего поля $H_n = 12000$ эрстэд, $H_0 = 2357$ эрстэд, $\nu_0 = 10,956$ мгц, $\tau_n = 6$ мксек, $\Delta H = 2$ эрстед/см³, $l_n = 400$ см, $l_n = 0,3$ см, $l_a = 0,5$ см, $l_0 = 1,93$ см, сечение трубопровода $S = 0,636$ см², $T_1 = 2$ сек.

Испытания проводились на воде в лабораторных условиях. Пределы измеряемых расходов составили $10 \div 100$ см³/сек, максимальная ошибка измерений — 1,7% при $v = 70,75$ см/сек, минимальная ошибка измерений — 0,24% при $v = 25,45$ см/сек.

Необходимо отметить, что по описанному устройству можно измерять непосредственно в потоке величину T_1 , значение которой крайне необходимо при определении пределов скоростей, так как при невыполнении условий (1) — (6) погрешность возрастает.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жерновой А. И., Латышев Г. Д. Ядерный магнитный резонанс в проточной жидкости. М., Атомиздат, 1964.
2. Зингер И. Аппаратура для измерения расхода жидкости с помощью ЯМР. Патент США кл. 324—5, № 3191119, заявл. 05.06.62, опубл. 22.06.65.
3. Екатеринни В. В. и др. ЯМР расходомеры. Сборник «Ядерный магнитный резонанс в движущихся образцах», изд-во «Наука», Казахской ССР, 1968.
4. Бородин П. М. ЖТФ, том XXXIV, № 7, 1328—1336, 1964.

МЕТОД ГРАДУИРОВКИ ФАЗОВЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ РАСХОДОМЕРОВ БЕЗ НАТУРНОЙ ПРОЛИВКИ

Одной из основных задач метрологии фазового ультразвукового контроля потока является выявление зависимости между его средней скоростью, определяющей объемный расход, и фазой ультразвуковой волны, поступившей на приемник после распространения через контролируемую среду.

В ряде опытно-конструкторских разработок фазовых ультразвуковых расходомеров в последние годы [1—3] были успешно применены акустические преобразователи расхода с несколькими преломляющими поверхностями раздела сред. Анализ таких систем целесообразно вести на основе представления лучевой акустики, приняв также допущение о том, что прием ультразвуковых колебаний производится в ближней зоне излучения. Ультразвуковой луч, поступающий на приемник, характеризуется полным временем распространения τ , расстоянием r_{2n+1} точки пересечения лучом плоскости приемника до его центра и углом α_{2n+1} между лучом и осью приемника. Эти параметры всей совокупности лучей определяют интегральную фазу электрического сигнала приемника. Аналитические выражения параметров преобразователей с n цилиндрическими преломляющими поверхностями приведены в [3]. Величина скорости потока v_p в точке J , отстоящей на расстоянии p от оси трубопровода радиусом R , для турбулентной области потока и большей части ламинарного подслоя может быть записана в виде выражения:

$$v_p = v \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\lambda'}{2}} \left[1,875 + 1,25 \ln \left(1 - \frac{p}{R} \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

где λ' — коэффициент сопротивления трубопровода;

v — средняя скорость потока.

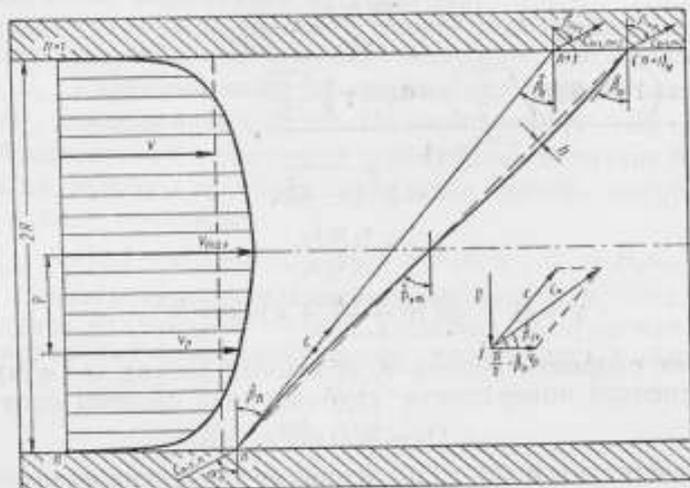
На рисунке показан профиль скоростей потока и схематичное распространение центрального луча при $\lambda' = 0,03$. Скорость потока v_p резко падает до нуля вблизи поверхности трубопровода и достигает максимума на его оси. Прямолинейная траектория луча между точками n и $n+1$ соответствует распространению в неподвижной жидкости, а криволинейная — между точками n и $(n+1)_p$ — в движущейся.

Разобъем поток на бесконечное число тонких цилиндрических слоев толщиной dr , соосных трубопроводу.

Примем также практически выполнимое допущение, что за время распространения луча профиль скоростей потока не изменяется. По-

лагая скорость потока в слое, прилегающем к внутренней поверхности трубопровода, равной нулю, можно прийти к выводу, что направление акустических лучей в потоке не остается постоянным и может быть определено через угол β_j между вектором c скорости ультразвука и нормалью в данной точке:

$$\cos \beta_{jv} = \frac{c}{c_{jv}} \cos \beta_j. \quad (2)$$



Профиль скоростей расхода.

При этом координаты точек выхода лучей из контролируемой жидкости будут определяться выражениями:

$$x_{(n+1)v} = x_{n+1} + \int_{-R}^R \frac{v_p dp}{c \cos \beta_j}, \quad y_{(n+1)v} = y_{n+1}, \quad z_{(n+1)v} = z_{n+1}, \quad (3)$$

из которых видно, что от скорости потока и его профиля зависят лишь координаты x точек выхода акустических лучей.

Угол преломления $\beta_{(n+1)v}$ в точках выхода лучей из жидкости в соответствии с (2) остается неизменным. Углы преломления на последующих границах раздела сред определяются этим углом и направляющими косинусами m_{H1} и n_{H1} в точках пересечения лучом границ раздела сред. В соответствии с (2) и (3) можно показать, что косинусы также не зависят от скорости потока. Поэтому направление распространения лучей во всех последующих средах преобразователя, в том числе и в волноводе приемника, остается неизменным при наличии потока. Координаты y, z точек пересечения лучом границ раздела ввиду постоянства углов преломления не зависят от скорости

потока, а координаты x имеют приращения, равные $\int_{-R}^R \frac{v_p dp}{c \cos \beta_j}$.

Анализ показывает, что время распространения луча во всех средах преобразователя, кроме волновода приемника, не зависит от скорости потока, а в последнем определяется выражением

$$\tau_{(2n, 2n+1)v} = \tau_{2n, 2n+1} = \frac{\sin \beta_n}{c \cos \alpha_{2n+1}} \int_{-R}^R \frac{v_p dp}{\cos \beta_j}. \quad (4)$$

На основании изложенного и с учетом

$$\cos \beta_j = \sqrt{1 - \left(\frac{z_0 \operatorname{tg} \beta_n}{R \operatorname{tg} \alpha_0}\right)^2} \cdot \cos \beta_n,$$

можно получить выражение для полного времени распространения луча в преобразователе:

$$\tau_{\text{п}} = \tau - \frac{2R \operatorname{tg} \beta_n}{\tau^2} v \cdot B_{\text{а.г.}}, \quad (5)$$

$$\text{где } B_{\text{а.г.}} = \frac{\varepsilon \left(1 + 0,625 \sqrt{\frac{\lambda'}{2}}\right) - 0,625 \gamma \sqrt{\frac{\lambda'}{2}}}{\cos \alpha_{2n+1}}, \quad (6)$$

$$\varepsilon = \sqrt{1 - b_n^2}, \quad (7)$$

$$b_n = \frac{z_0 \operatorname{tg} \beta_n}{R \operatorname{tg} \alpha_0}. \quad (8)$$

$$\gamma = (1 - \varepsilon) \left(\ln \frac{1 + \varepsilon}{1 - \varepsilon} + \varepsilon \ln \frac{1 - \varepsilon}{2\varepsilon} \right). \quad (9)$$

Средняя скорость потока v , объемный расход Q ($\text{м}^3/\text{ч}$) и радиус R (м) внутренней поверхности трубопровода связаны соотношением

$$Q = 3600 \pi R^2 v. \quad (10)$$

В соответствии с (5) и (10) основные уравнения фазового ультразвукового расходомера будут иметь вид

$$\Delta \varphi = \frac{8\pi f R \operatorname{tg} \beta_n}{\tau^2} v \bar{B}_{\text{а.г.}}, \quad (11)$$

$$\Delta \varphi = \frac{f \operatorname{tg} \beta_n}{450 \tau^2 R} Q \cdot \bar{B}_{\text{а.г.}}, \quad (12)$$

где $\Delta \varphi$ — фазовый сдвиг, рад ;

f — частота ультразвуковых колебаний, Гц ;

$\bar{B}_{\text{а.г.}}$ — поправочный акустико-гидродинамический коэффициент.

Требуемый фазовый сдвиг $\Delta \varphi$ при заданных значениях c , R , Q или v целесообразно устанавливать изменением частоты колебаний f , тогда как величину угла излучения α_0 , определяющую β_n , рассчитывать из условий автоматической компенсации температурных и концентрационных погрешностей.

Из полученных выражений видна прямая пропорциональность между сдвигом фаз, регистрируемым фазометром расходомера, и контролируемым параметром. Это позволяет производить градуировку фазового расходомера без натурной проливки, используя электрический аналог двухканального акустического измерительного преобразователя.

В преобразователе имеет место фазовый сдвиг, равный $\frac{\Delta \varphi}{2}$ в одном и $-\frac{\Delta \varphi}{2}$ во втором каналах. Для аналога достаточно вводить фазовый сдвиг, равный $\Delta \varphi$, в один канал. В этом случае аналог может быть выполнен в виде двух безреактивных аттенюаторов и калиброванного фазорегулятора. В качестве последнего могут быть использованы плавко-переменные электрические линии задержки или емкостный фазовращатель [4, 5].

При градуировке к генераторным выходам расходомера один из его приемных входов подключается через аттенюатор, а другой — через последовательно соединенные аттенюатор и фазорегулятор.

Величина аттенюации устанавливается такой, чтобы на приемные входы поступало высокочастотное напряжение, по амплитуде равное напряжению принятых в преобразователе сигналов. Фазовый сдвиг устанавливается ступенями в пределах диапазона измерений, рассчитанного согласно выражениям (11) или (12).

При расчете величины фазового сдвига необходимо предварительное определение поправочного акустико-гидродинамического коэффициента $\bar{B}_{a,r}$, который может быть получен усреднением значений величин $B_{a,r}$ для отдельных лучей. Из выражений (6)–(9) следует, что для преобразователя с известными параметрами величина $B_{a,r}$ является функцией координаты z_0 точек излучения лучей, которую можно записать в виде полинома

$$B_{a,r} = f(z_0) = B_0 + B_1 z_0 + B_2 z_0^2 + B_3 z_0^3 + \dots + B_n z_0^n. \quad (13)$$

Если принять чувствительность приемника для всех падающих на него лучей одинаковой, то для дисковых пьезоэлементов радиусом r поправочный коэффициент можно представить в виде интеграла

$$\bar{B}_{a,r} = \frac{A}{\pi r^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^r f(z) \rho d\rho d\theta, \quad (14)$$

в котором величина $B_{a,r}$ для каждого луча записывается в виде полинома $f(z)$, а θ является углом между радиус-вектором точки излучения и осью z [3], перпендикулярной плоскости чертежа на рисунке. Учитывая, что $z = \rho \cos \theta$, и ограничиваясь четырьмя членами полинома, после интегрирования получим

$$\bar{B}_{a,r} = B_0 + B_1 \frac{r}{0,75\pi} + B_2 \frac{r^2}{4} + B_3 \frac{r^3}{1,875\pi}. \quad (15)$$

Составление и решение системы четырех уравнений (13) при значениях z_0 , равных нулю, $0,5r$, $0,7r$ и r дает значения B_0 , B_1 , B_2 и B_3 . Подстановка последних в (15) приводит к результату:

$$\bar{B}_{a,r} = B_0 + 0,837 (B_{0,5r} - B_0) - 0,166 (B_{0,7r} - B_0) + 0,122 (B_r - B_0). \quad (16)$$

В итоге получение поправочного коэффициента $\bar{B}_{a,r}$ сводится к определению коэффициента $B_{a,r}$ для указанных четырех лучей согласно (6) и последующему расчету по формуле (16).

Разработанный метод градуировки реализован в СКБ „Цветметавтоматика“ и используется при эксплуатации фазовых ультразвуковых расходомеров УЗР-1 и УЗР-2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бражников Н. И. Способ ввода ультразвуковой волны в расходомере с жидкостным звукопроводом. Авт. свидетельство СССР, № 151053, 1960.
2. Fishbacher R. E. Ultrasonic Flowmeter Design. Control, 1962, v. 5, № 43, p. 93.
3. Биргер Г. И., Бражников Н. И. Ультразвуковые расходомеры. М., „Металлургия“, 1964.
4. Асеев Б. П. Фазовые соотношения в радиотехнике. М., Связьиздат, 1958.
5. Флоркин В. Т. Индикаторные устройства. М., Оборонгиз, 1956.

ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧИСЛА ОБОРОТОВ СЧЕТЧИКА

Для поверки счетчиков жидкостей и газов с помощью трубопоршневых установок (ТПУ) (небольшого калиброванного объема), основанных на принципе вытеснения, иностранными фирмами (например, Halmer) разработаны электроимпульсные приставки к счетчикам, которые позволяют дробить единицу низшего разряда их счетных устройств. Известно, что требуемый объем калиброванного участка при заданной точности калибровки прямо пропорционален наименьшему дискретному приращению объемного количества жидкости, фиксируемому поверяемым счетчиком. Например, если счетчик отсчитывает до 10 л, то для калибровки с точностью 0,01% потребуются калибровочный объем в 10000 раз больший, т. е. $10 \text{ л} \cdot 10000 = 100000 = 100 \text{ м}^3$, что практически неприемлемо. Если же специальная приставка обеспечит преобразование одного оборота счетчика в 1000 электрических импульсов, то каждый из этих импульсов будет соответствовать 10/1000 доли литра, т. е. 0,01 л, и минимальный необходимый объем ТПУ составит всего $0,01 \cdot 10000 = 0,1 \text{ м}^3$ [3]. Следовательно, чем большее число электрических импульсов можно получить за один оборот ротора (барабана) счетчика, тем меньше будет объем калиброванного участка трубы трубопоршневой установки [5]. Непосредственное преобразование числа оборотов счетчика в соответствующее большое число электрических импульсов является затруднительным, поэтому у большинства известных зарубежных конструкций электроимпульсных приставок к счетчикам вводятся механические ускоряющие передачи, устанавливаемые между выходным валом счетчика и входным валом импульсного датчика. Между этими валами осуществляется связь жесткая или с помощью гибкого вала. Конструктивно электроимпульсная приставка привязана к поверяемому счетчику и обеспечивает возможность его поверки на трубопоршневой установке [1].

Счетчики жидкостей и газов, выпускаемые отечественной промышленностью, не приспособлены для поверки на трубопоршневых установках, так как не имеют в своем комплекте электроимпульсных преобразователей.

Сложность разработки электроимпульсных преобразователей состоит в том, что известные конструкции преобразователей, как отмечалось, имеют механические ускоряющие передачи, которые создают дополнительную нагрузку на чувствительном элементе прибора, снижая его чувствительность и точность. Конструкции извест-

ных преобразователей в силу указанного недостатка, а также из-за отсутствия их единого изготовления и аттестации в комплекте со счетчиками, выпускаемыми нашей промышленностью, не могут быть применены для обеспечения поверки на трубопоршневых установках и требуют принципиально нового решения их выполнения.

В настоящей работе делается попытка создать электроимпульсный преобразователь, который позволит производить поверку счетчиков жидкостей и газов на трубопоршневых установках при сохранении чувствительности и точности в режиме поверки, без нарушения их конструкции. Эта цель достигается путем исключения механических связей между выходным валом ротора счетчика и входным валом импульсного датчика за счет замены механической ускоряющей передачи электрической. В качестве ускоряющего звена в преобразователе применен синхронный двигатель, который одновременно является силовым элементом, осуществляющим вращение вала импульсного датчика. Синхронный двигатель питается через усилитель от индукционной приставки, закрепленной на счетчике, и взаимодействует с ним через его выходной вал без механических связей и нагрузок.

Используемая дистанционная электрическая передача вращения от вала ротора (барабана) счетчика к валу импульсного датчика основана на частотном методе передачи скорости вращения, вследствие чего погрешность передачи не зависит в определенных пределах от параметров индукционной приставки и линии связи [2, 3, 4].

При вращении ротора счетчика с насаженным на его валу якорем в статорных обмотках индукционной приставки возбуждается трехфазная э. д. с., частота которой связана со скоростью вращения ротора соотношением [4]

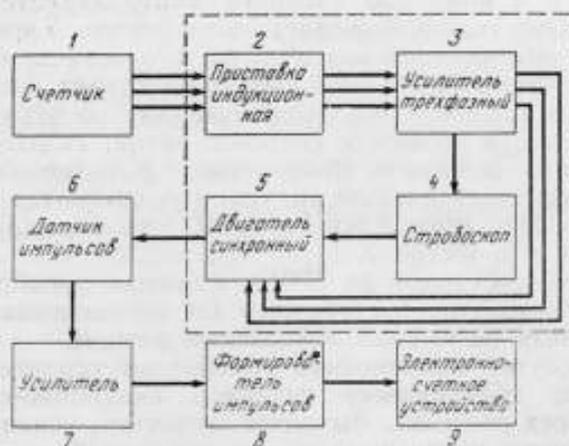
$$f = \frac{PN}{60}, \text{ гц,}$$

где P — число пар полюсов;

N — скорость ротора, об/мин;

f — частота.

Сущность устройства преобразователя поясняется блок-схемой, приведенной на рисунке.



Блок-схема электронного преобразователя числа оборотов счетчика.

Электроимпульсный преобразователь включает в себя: поверяемый счетчик 1, на котором закрепляется индукционная приставка 2, состоящая из якоря (зубчатой шестерни), устанавливаемого на валу ротора счетчика 1 и статора, представляющего блок из трех индукционных датчиков, фиксируемых на корпусе приставки относительно зубцов якоря с полюсным делением, соответствующим сдвигу фаз на 120 электрических градусов в возбуждаемом трехфазном напряжении. Индукционная приставка 2 питает через трехфазный усилитель 3, стробоскоп 4 и синхронный двигатель 5, вращающий входной вал датчика импульсов 6, импульсы которого через усилитель 7 и формирователь импульсов 8 суммируются в электронно-счетном устройстве 9.

Сочетание устройств, очерченных пунктирной линией на блок-схеме, является отличительным от известных конструкций преобразователей и подлежит экспериментально-теоретическому исследованию.

Вследствие широкого диапазона изменения частоты, обусловленной различными режимами поверяемого счетчика, преобразование однофазного напряжения в трехфазное с малым коэффициентом нелинейных искажений и выдерживанием симметрии фаз является практически весьма сложным. Поэтому такой путь преобразования напряжения неприемлем. В частном случае получение сигнала осуществляется непосредственным генерированием трехфазного напряжения индукционной приставкой. Дальнейшее преобразование полученного трехфазного напряжения с учетом налагаемых требований не представляет затруднений.

Работа преобразователя заключается в следующем:

Якорь индукционной приставки 2, насаженный на валу ротора счетчика 1, вращаясь, наводит в статорных обмотках индукционных датчиков этой приставки соответствующее по частоте и режиму поверяемого счетчика 1, трехфазное напряжение со сдвигом фаз в 120 электрических градусов, которое подается на трехфазный усилитель 3, где усиливается и поступает затем на синхронный двигатель 5, который втягивается в синхронизм и вращается с частотой, строго пропорциональной частоте питающего напряжения. Одновременно с питанием двигателя 5 напряжение с усилителя 3 подается на стробоскоп 4, с помощью которого контролируется втягивание в синхронизм двигателя 5. Вращаясь, вал двигателя 5 вращает жестко соединенный с ним входной вал импульсного датчика 6, на котором установлен модуляционный диск светового потока. Модуляционный диск с большим числом равно расположенных по периметру отверстий модулирует при вращении световой поток, падающий на фотодиод импульсного датчика 6. Получаемые с фотодиода от модуляции светового потока электрические импульсы усиливаются усилителем 7 и формируются формирователем 8, после чего суммируются в электронно-счетном устройстве 9.

При проверке счетчиков на ТПУ с помощью преобразователя необходимо иметь момент, достаточный для обеспечения входа двигателя в синхронизм на каждом поверяемом режиме.

В данном случае выполняет питание синхронно-гистерезисный двигатель на всех режимах. Выходная мощность усилителя не менее 25 *вт*, коэффициент нелинейных искажений — не более 5%, питание от сети 220 *в*, 50 *гц*. Выходное сопротивление его согласуется с сопротивлением фаз двигателя с помощью выходного трансформатора.

который одновременно является развязкой между источником постоянного напряжения и нагрузкой.

Описанный преобразователь обрабатывается на счетчике газа типа РГ-40. Стыковка преобразователя со счетчиком производится при помощи установки индукционной приставки на самом приборе без нарушения его конструкции, посредством жесткого соединения якоря с осью ротора через имеющееся отверстие. Индукционная приставка, используемая в преобразователе, выбрана по соображениям конструктивных особенностей данного типа поверяемого счетчика и удобства согласования ее работы с трехфазным усилителем. Разработаны конструкция, блок-схема и принципиальная электрическая схема преобразователя.

При такой последовательности сочетаний известных устройств вал ротора счетчика свободен от непосредственной механической передачи вращения валу импульсного датчика, не испытывает существенной дополнительной нагрузки, и за один его оборот получается достаточно большое количество (≈ 1500) электрических импульсов. Число импульсов может быть увеличено за счет применения высокооборотного синхронного двигателя большой мощности и значительного увеличения числа отверстий в модуляционном диске.

Выводы

Создание и применение подобного электроимпульсного преобразователя числа оборотов счетчика в соответствующее число электрических импульсов обеспечивает:

1. Возможность проведения поверки эталонных, а также рабочих счетчиков на ТПУ при высокой степени сравнения отсчитываемого объема, фиксируемого поверяемым счетчиком, с калиброванным.
2. Сохранение чувствительности и точности счетчиков в режиме их поверки.
3. Уменьшение калиброванного объема ТПУ при заданной точности.
4. Автоматизацию процесса проведения поверки счетчиков на ТПУ.
5. Неизменяемость конструкции поверяемых счетчиков.

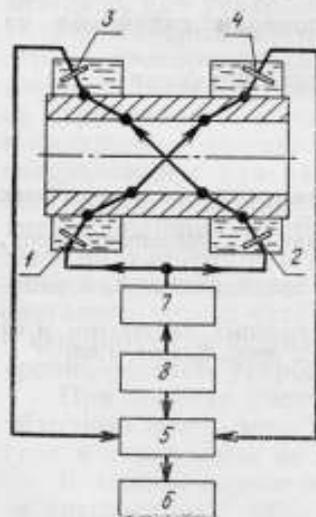
ЛИТЕРАТУРА

1. Новые приборы и оборудование на трубопроводном транспорте и нефтебазах за рубежом. М., Изд-во ВНИИОНГ, 1966.
2. Агейкин Д. И. Датчики контроля и регулирования. М., «Машиностроение», 1965.
3. Утямышев Р. И. Техника измерения скоростей вращения. М.-Л., Госэнергоиздат, 1961.
4. Ермолин В. И. Исследование указателей авиационных тахометров и их двигателей с помощью электронной модели датчика. Канд. дисс., Казань, 1968.
5. Стандарт США, API-2531, 1963.

КОМПЕНСАЦИЯ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ДВУХКАНАЛЬНЫХ ФАЗОВЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ РАСХОДОМЕРОВ

Существуют методы акустической компенсации концентрационных погрешностей фазовых ультразвуковых расходомеров [1], которые осуществляются вводом волны в контролируемую среду при средней ее концентрации под углом 45° . Для этого необходимо, чтобы волноводные среды между пьезоэлементами и потоком имели низкие значения скорости ультразвука, не превышающие скорость ультразвука в потоке более чем на 20–25%.

В ряде практических случаев, например, при контроле потоков жидкости в трубопроводах под повышенными давлениями ультразвуковая волна должна вводиться в поток непосредственно через стенки металлических трубопроводов без нарушения их целостности. Скорость же распространения ультразвуковой волны в конструкционных металлах более чем в 1,5–2 раза превышает скорость ультразвука в контролируемых потоках. Следовательно, здесь ни при каких условиях невозможен ввод ультразвука в поток под углом 45° к его оси. Поэтому при построении акустических преобразователей расхода без нарушения целостности стенок металлического трубопровода, акустическая компенсация концентрационных погрешностей оказывается неосуществимой.



Блок-схема ультразвукового расходомера с компенсацией концентрационных погрешностей.

Проведенные в СКБ исследования позволили создать новый метод, который обеспечивает компенсацию концентрационных погрешностей двухканальных фазовых ультразвуковых расходомеров как при необходимости нарушения целостности стенок трубопровода, так и без нее.

Сущность его заключается в следующем. Через одинаковые интервалы времени с периодом, равным удвоенному максимуму $2\tau_{\max}$ времени распространения ультразвука в потоке, производится излу-

чение пьезоэлектрическими излучателями 1, 2 (см. рисунок) и затем прием приемниками 3, 4 одновременно в обоих электронно-акустических каналах. Причем суммарное время распространения ультразвука в промежуточных средах между пьезоэлементами и контролируемым потоком устанавливается равным разности максимального τ_{\max} и минимального τ_{\min} времени распространения ультразвука в потоке.

Тогда на фазовый детектор фазометра 5 будут поступать пакеты сигналов с длительностью τ_c , равной разности между периодом излучения — приема $2\tau_{\max}$ и полным временем распространения волны от излучателя к приемнику: $\tau + \tau_{\max} - \tau_{\min}$.

$$\tau_c = \tau_{\max} - \tau + \tau_{\min} = 2\tau_0 - \tau, \quad (1)$$

где $\tau_0 = \frac{D}{c_0 \cos \beta_0}$ — время распространения волны в контролируемой среде при среднем значении ее концентрации;

$\tau = \frac{D}{C \cos \beta}$ — время распространения волны в контролируемой среде при переменной концентрации;

D — внутренний диаметр трубопровода;

C_0, C — скорости ультразвука в контролируемой среде при среднем и переменном значениях концентрации;

β_0, β — углы между нормалью к оси трубопровода и направлением распространения ультразвука в потоке при среднем и переменном значениях концентрации.

Детектированные пакеты, амплитуда которых определяется выражением (2), а длительность зависит от изменений концентрации, интегрируются и преобразуются в постоянный ток, поступающий на регистрирующий прибор 6, шкала которого градуирована в единицах расхода.

Управление импульсным режимом генератора 7 и фазометра 5 осуществляется модулятором 8, вырабатывающим равнотактные прямоугольные видеопульсы с периодом $2\tau_{\max}$.

Вследствие переменной длительности пакетов τ_c происходит автоматическая компенсация изменений показаний расходомера, вызванных изменением концентрации контролируемой среды. Покажем аналитически этот факт. При непрерывном излучении и приеме ультразвуковых сигналов для существующих методов измерения расхода формула амплитуды выходного тока I_m фазового детектора [2] имеет вид

$$I_m = \frac{A\pi f D \sin \alpha}{CC_1 \cos \beta} K_2 v \cdot B_{a,r}, \quad (2)$$

где f — частота ультразвуковых колебаний;

α — угол излучения во внешнем звукопроводе;

C_1 — скорость ультразвука во внешнем волноводе;

K_2 — постоянный коэффициент, зависящий от выходных параметров фазоизмерительной схемы;

$B_{a,r}$ — поправочный акустико-гидродинамический коэффициент;

v — средняя скорость потока.

В случае пакетных колебаний, поступающих в рассматриваемом методе на фазовый детектор, выходной ток последнего I после инте-

гирования равен произведению амплитуды его пакетов I_m и отношения длительности пакетов τ_c к периоду их следования $2\tau_{\max}$:

$$I = \frac{2\tau_0 - \tau}{2\tau_{\max}} \cdot I_m. \quad (3)$$

Подставляя значения τ_1, τ_0 и I_m , получим

$$I = K_1 \frac{C_0 \cos \beta_0}{C \cos \beta} \left(2 - \frac{C_0 \cos \beta_0}{C \cos \beta} \right) v, \quad (4)$$

где K_1 — мало изменяющийся коэффициент, равный

$$K_1 = \frac{2\pi f K_x \tau_0^2 \sin \alpha}{C_1 \tau_{\max}} \bar{B}_{a,r}. \quad (5)$$

Для выяснения, что компенсация концентрационных погрешностей обеспечивается разработанным методом, необходимо показать, что первая производная выражения (4) по концентрации q обращается в нуль при среднем значении концентрации.

Дифференцируя правую часть выражения (4), получим

$$\frac{dI}{dq} = 2K_1 C_0 \cos \beta_0 \cdot v \left(1 - \frac{C_0 \cos \beta_0}{C \cos \beta} \right) \frac{d}{dq} \left(\frac{1}{C \cos \beta} \right). \quad (6)$$

Произведя дифференцирование выражения $\frac{1}{C \cos \beta}$ с подстановкой

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \frac{C^2}{C_1^2} \sin^2 \alpha}, \text{ получим}$$

$$\frac{d}{dq} \left(\frac{1}{C \cos \beta} \right) = \frac{a'}{C \cos \beta} (\operatorname{tg}^2 \beta - 1), \quad (7)$$

где $a' = \frac{dC}{Cdq}$ — относительный концентрационный коэффициент скорости ультразвука в контролируемой жидкости.

Следовательно,

$$\frac{dI}{dq} = 2a' K v \frac{C_0 \cos \beta_0}{C \cos \beta} \left(1 - \frac{C_0 \cos \beta_0}{C \cos \beta} \right) (\operatorname{tg}^2 \beta - 1). \quad (8)$$

Таким образом, первая производная тока детектора I по концентрации q обращается в нуль при

$$C \cos \beta = C_0 \cos \beta_0. \quad (9)$$

т. е. при среднем значении концентрации q_0 , причем независимо от выбора акустических параметров измерительного преобразователя.

Представляет практический интерес рассмотреть диапазон эффективного функционирования описываемого метода.

Подставляя в (3) значение I_m из выражения (2) и учитывая, что

$$\tau = \frac{D}{C \cos \beta}, \text{ получим}$$

$$I = K_2 v \frac{2\tau_0 - \tau}{2\tau_{\max}} \tau, \quad (10)$$

где K_2 — мало изменяемый коэффициент, равный

$$K_2 = \frac{4\pi f \sin \alpha}{C_1} B_{a,r} K_x. \quad (11)$$

Ток регистрации при средней концентрации q_0 , когда $\tau = \tau_0$, составляет

$$I_0 = K_2 v \frac{\tau_0^2}{2\tau_{\max}}. \quad (12)$$

Рассмотрим диапазон изменений времени распространения τ , обусловленный изменением концентрации (состава) контролируемого потока $\tau_{\min} + \tau_{\max}$, составляющий $(0,95 + 1,05)\tau_0$, что, например, соответствует изменениям скорости ультразвука в нефтях в диапазоне $1250 + 1400$ м/сек.

В этом случае получим:

$$I_0 = \frac{K_2 \tau_0}{2,1} v,$$

$$I_{\min} = 0,9975,$$

$$I_{\max} = 0,9975.$$

Таким образом, при изменении времени распространения ультразвука в исследуемой среде на $\pm 5\%$ показания расходомера будут изменяться всего на $0,25\%$.

Рассматриваемый метод реализован в ультразвуковом расходомере нефти и нефтепродуктов, разработанном СКБ „Транснефть-автоматика“.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биргер Г. И., Бражников Н. И. Ультразвуковые расходомеры. М., „Металлургия“, 1964.
2. Бражников Н. И. Ультразвуковая фазометрия. М., „Энергия“, 1968.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ФАЗОВЫЙ КОНТРОЛЬ СКОРОСТИ ПОТОКА ЖИДКОСТИ ИЛИ ГАЗА

Существуют методы акустической компенсации температурных погрешностей фазовых ультразвуковых расходомеров, основанные на подборе скорости ультразвука, знака и величины ее температурного коэффициента во внешних волноводах акустического преобразователя расхода [1, 2]. Эти способы в принципе применимы для значительного количества контролируемых сред. Однако в ряде случаев условия температурной компенсации приводят к снижению чувствительности расходомера. Особенно это относится к тем средам, в которых температурный коэффициент близок по величине и противоположен знаку температурного коэффициента скорости ультразвука в волноводе.

Кроме того, например, при одинаковых знаках температурных коэффициентов и значительном различии значений скорости ультразвука в контролируемой среде и в волноводе акустическая температурная компенсация оказывается неосуществимой.

В СКБ разработан и проверен на практике новый метод компенсации, позволяющий вести эффективный контроль скорости потока жидкости или газа с компенсацией температурных погрешностей, практически независимо от их величины и знака.

Сущность разработанного метода заключается в том, что при равнотактном двухканальном излучении и приеме ультразвука с периодом, равным удвоенному максимуму времени его распространения в потоке, ультразвуковые колебания излучаются и принимаются через волноводные среды, скорость ультразвука в которых постоянная, либо имеет температурный экстремум при средней температуре потока, а время распространения в них устанавливается равным максимальному температурному изменению времени прохождения ультразвука в потоке.

Согласно этому методу контроля на фазоизмерительное устройство будут поступать пакеты ультразвуковых сигналов переменной длительности τ_c , зависящей от времени распространения τ в потоке и, соответственно, от его температуры:

$$\tau_c = 2\tau_{\max} - [\tau + (\tau_{\max} - \tau_{\min})] = 2\tau_0 - \tau, \quad (1)$$

где τ_{\min} , τ_{\max} — минимальные и максимальные времена распространения ультразвука в потоке, соответствующие краям температурного интервала;

τ_0 — время распространения при средней температуре потока.

При этом выходной ток I фазоизмерительного устройства определяется выражением

$$I = K_x \frac{2\tau_0 - \tau}{2\tau_{\max}} \Delta\varphi, \quad (2)$$

где K_x — постоянный коэффициент фазоизмерительной схемы;
 $\Delta\varphi$ — разность фаз принятых сигналов акустических каналов.
 Разность фаз может быть представлена в виде

$$\Delta\varphi = 4\pi f \tau \frac{v \sin \alpha}{C_1}, \quad (3)$$

где v — скорость потока;
 α — угол излучения;
 C_1 — скорость ультразвука в волноводах.
 Следовательно,

$$I = K \frac{\tau}{C_1} (2\tau_0 - \tau). \quad (4)$$

Здесь K — постоянный коэффициент, определяемый выражением

$$K = \frac{4\pi f K_x v \sin \alpha}{2\tau_{\max}}. \quad (5)$$

Вполне очевидно, что при компенсации температурных погрешностей в средней температурной точке (при $\tau = \tau_0$) должен быть какой-либо температурный экстремум величины I .

Необходимым и достаточным его условием существования является равенство нулю первой производной тока I по температуре t , т. е.

$$\frac{dI}{dt(\tau=\tau_0)} = 0. \quad (6)$$

Определим, выполняется ли это условие. Для этого возьмем первую производную по t от I :

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dt} &= KC_1 \left(2\tau_0 \frac{d\tau}{dt} - 2\tau \frac{d\tau}{dt} \right) - K(2\tau_0 - \tau) \frac{dC_1}{dt}, \\ \frac{dI}{dt} &= 2KC_1(\tau_0 - \tau) \frac{d\tau}{dt} - K(2\tau_0 - \tau) \frac{dC_1}{dt}. \end{aligned} \quad (7)$$

Поскольку, согласно разработанному методу, скорость ультразвука в волноводах C_1 выбрана с температурным экстремумом или постоянна, то при $\tau = \tau_0$ оба слагаемых в правой части (7) обращаются в нуль и, следовательно, условие (6) выполняется.

Рассмотрим эффективность метода на примере контроля скорости потока, максимальное значение которой составляет 2 м/сек в нефтепроводе диаметром 1000 мм в температурном диапазоне $0-30^\circ \text{С}$. Причем при средней температуре 15°С скорость ультразвука в потоке составляет 1200 м/сек , а ее температурный коэффициент отрицателен и равен $\frac{4 \text{ м/сек}}{\text{град}}$.

Выбрав частоту ультразвука равной 1 МГц и разность фаз $\Delta\varphi$, соответствующей максимальной скорости потока, равной 100° , полу-

чим значение угла β_0 , под которым должна вводиться волна в поток при средней рабочей температуре 15°C :

$$\Delta\varphi = 4\pi \frac{100}{180} = \frac{4\pi Df \operatorname{tg} \beta}{C^2} v,$$

откуда
$$\beta_0 = \operatorname{arctg} \frac{C^2}{7,2 Dfv} = \operatorname{arctg} \frac{1,44 \cdot 10^6}{7,2 \cdot 10^6 \cdot 2} = \operatorname{arctg} 0,1 = 5^\circ 44'.$$

Полагая скорость ультразвука во внешнем звукопроводе C_1 неизменной, определим минимальные и максимальные углы β в потоке:

$$\beta_{\min} = \operatorname{arcsin} \frac{C_{\min}}{C_0} \sin \beta_0 = 5^\circ 28',$$

$$\beta_{\max} = \operatorname{arcsin} \frac{C_{\max}}{C_0} \sin \beta_0 = 6^\circ 1'.$$

Определяем среднее τ_0 , максимальное τ_{\max} и минимальное τ_{\min} времена распространения ультразвука в потоке (мксек):

$$\tau_0 = \frac{D}{C_0 \cos \beta_0} = \frac{1000}{1200 \cdot 0,9950} = 837,5,$$

$$\tau_{\max} = \frac{D}{C_{\min} \cos \beta_{\min}} = \frac{1000}{1140 \cdot 0,9952} = 881,4,$$

$$\tau_{\min} = \frac{D}{C_{\max} \cos \beta_{\max}} = \frac{1000}{1260 \cdot 0,9948} = 790,8.$$

Полагая, что при определенном образом выбранной величине K_2 сдвигу фаз 100° соответствует ток I_0 фазового детектора, равный 100 мка при среднем значении τ_0 , получим:

$$I_0 = 100 = \frac{K}{C_1} \cdot \tau_0 (2\tau_0 - \tau_0) = \frac{K}{C_1} \tau_0^2,$$

откуда

$$\frac{K}{C_1} = \frac{100}{\tau_0^2}.$$

Следовательно,

$$I_{\min} = 100 \frac{\tau_{\min} (2\tau_0 - \tau_{\min})}{\tau_0^2} = 99,7 \text{ мка},$$

$$I_{\max} = 100 \frac{\tau_{\max} (2\tau_0 - \tau_{\max})}{\tau_0^2} = 99,7 \text{ мка}.$$

Погрешность измерения расхода минимальна при изменениях температуры вокруг ее среднего значения и максимальна на краях рабочего диапазона температур. В рассмотренном случае максимальная погрешность при осуществлении температурной компенсации не превышает $0,3\%$.

Сравним полученные результаты с работой того же ультразвукового расходомера без применения предлагаемого метода. Здесь, если также принять ток I_0 , соответствующий сдвигу фаз 100° при среднем значении τ_0 , равным 100 мка , получим (мка):

$$I_{\min} = I_0 \frac{\tau_{\min}}{\tau_0} = 94,4,$$

$$I_{\max} = I_0 \frac{\tau_{\max}}{\tau_0} = 105,2.$$

Из сопоставления результатов функционирования расходомера с температурной компенсацией и без нее видно, что применение разработанного метода в рассмотренном случае снижает температурную погрешность примерно в 15 раз.

Рассмотренный метод применен в ультразвуковом расходомере нефтепродуктов, разработанном СКБ „Транснефтьавтоматика“.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биргер Г. И., Бражников Н. И. „Акустический журнал“, т. XI, 1963, № 1.
2. Биргер Г. И., Бражников Н. И. Ультразвуковые расходомеры. М., „Металлургия“, 1964.

ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ
УЛЬТРАЗВУКА В ТРУБОПРОВОДАХ МАЛОГО ДИАМЕТРА

Измерение расхода жидкостей в трубопроводах малого диаметра (порядка нескольких миллиметров) с помощью ультразвука представляет актуальную проблему для тех случаев, когда контролируются агрессивные и неэлектропроводные жидкости. Но решению этой задачи препятствует ряд трудностей, а именно: относительно большая погрешность, возникающая вследствие малой величины расхода, и появление акустической помехи из-за распространения сигнала по стенке трубопровода.

В [1, 2, 3] описаны ультразвуковые приборы, работающие в импульсном режиме и предназначенные для измерения расхода крови в кровеносных сосудах, но они имеют ограниченную область применения и обладают невысокой точностью.

Ввод ультразвуковых колебаний в контролируемую среду можно осуществить несколькими способами. Один из вариантов состоит в применении датчика с одной или двумя преломляющими поверхностями, как и в случае трубопроводов большого диаметра. При этом целесообразно выбрать повышенную рабочую частоту, порядка 20 МГц, для сохранения соотношений между геометрическими размерами датчика и длинами звуковых волн. Кроме того, из-за большой кривизны поверхности трубопровода следует использовать вместо дисковых преобразователей пьезоэлементы в виде половинок полового усеченного конуса, разрезанного по образующей. Их необходимо располагать так, чтобы воображаемая ось усеченного конуса совпадала с осью трубопровода (рис. 1 а). Тогда проекции лучей на плоскость, перпендикулярную оси трубы, будут направлены по нормали к границе раздела с контролируемой средой [4].

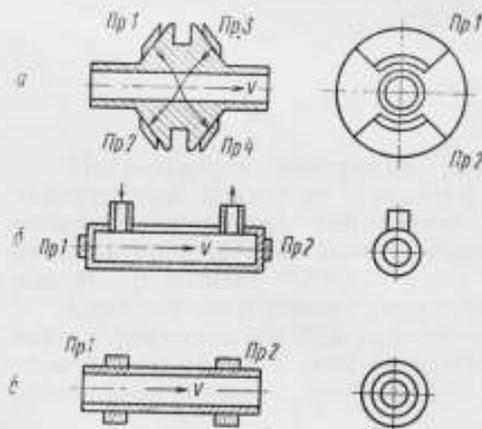


Рис. 1. Способы ввода ультразвуковых колебаний в трубопровод малого диаметра: а — датчик с преломлением; б — датчик с преобразователями, укрепленными на торцах измерительного участка трубопровода; в — датчик с цилиндрическими преобразователями.

Ультразвуковые колебания можно ввести в движущийся поток жидкости с помощью дисковых преобразователей (*Пр*), укрепленных на торцах измерительного участка (рис. 1 б), или цилиндрических преобразователей через боковую стенку трубопровода (рис. 1 в). При этом рабочую частоту следует выбирать так, чтобы длина волны в жидкости была больше внутреннего диаметра трубы. Тогда вдоль оси будет распространяться плоская волна [5]. Одновременно в стенке трубопровода возникает изгибная волна, представляющая собой акустическую помеху. Особенно сильной она будет в случае применения цилиндрических преобразователей. Но это самый подходящий вариант, так как здесь не требуется изменять конфигурацию трубопровода.

Для разделения полезного сигнала, распространяющегося по жидкости, и акустической помехи можно воспользоваться импульсным режимом работы. Однако форма импульсов, прошедших через датчик, значительно искажается, что затрудняет отделение полезного сигнала и снижает точность измерений. Поэтому целесообразно осуществить специальные меры для подавления помехи: изготовить трубопровод из материала, обладающего большим затуханием, нанести звукопоглощающее покрытие на внешнюю поверхность датчика или предусмотреть утолщения в стенке измерительной части трубы.

Для выяснения эффективности этих мер были проделаны эксперименты [6]. Блок-схема установки включала (рис. 2): генератор прямоугольных импульсов 1, генератор непрерывных колебаний 2, модулятор 3, преобразователь-излучатель 4, измерительный участок трубопровода 5, преобразователь-приемник 4, усилитель 6, импульсный вольтметр 7 и осциллограф 8. В установке использовались стандартные измерительные приборы: Г5-7А, ГСС-6, УШ-10, В4-1А и С1-13. Модулятор был собран на одной лампе 6П9 с колебательным контуром в анодной цепи. Синусоидальные колебания подавались на управляющую сетку, положительные импульсы — на экранную. В качестве преобразователей применялись цилиндрические элементы с внутренним диаметром 6 мм, внешним — 8 мм и высотой 7 мм. С помощью смолы ЭД-5 они были приклеены к трубопроводу, который состоял из трех частей, скрепленных резьбовыми соединениями. Преобразователи были укреплены на двух крайних латунных трубках длиной 70 мм. В качестве средней сменной части длиной 145 мм испытывалось большое количество трубок, изготовленных из различных материалов и с различной формой утолщения (рис. 3). Внутренний диаметр всех трубок составлял 4 мм. Частота заполнения радиопульсов, поступающих на излучатель, равнялась 230 кГц и соответствовала частоте механического резонанса преобразователей. Длительность импульсов составляла 40 мксек, амплитуда — 5 в.

Когда в средней части трубопровода использовалась ровная латунная трубка с толщиной стенки 1 мм, акустическая помеха имела большую величину, соизмеримую с полезным сигналом (рис. 4а, б). Нанесение на поверхность трубопровода поглощающего покрытия резко уменьшало помеху. Особенно эффективным было покрытие из эпоксидной смолы с наполнителем из карбида

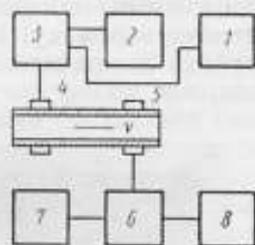


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки.

кремния (50% по весу). В этом случае величина помехи уменьшалась более чем на порядок. При установке латунных трубок с различным профилем в сечении также наблюдалось уменьшение сигнала, распространяющегося по стенке.

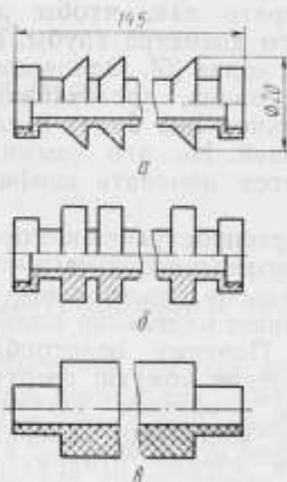


Рис. 3. Варианты средней сменной части трубопровода:

a, б — трубки из латуни; *в* — трубка из фторопласта.

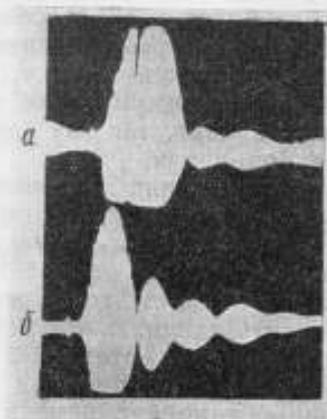


Рис. 4. Импульсы:

a — прошедший через ровную трубку, заполненную водой; *б* — прошедший через ровную трубку без воды.

Форма и шаг утолщений влияли на величину ослабления. В случае конических утолщений с шагом 9 мм и диаметром 20 мм, направленных вершинами к излучателю, акустическая помеха практически исчезала (рис. 5 *a, б*). Сочетание поглощающего покрытия со сложным профилем в сечении давало возможность надежно устранить помеху. Избавиться от нее позволяло также применение трубок из различных пластмасс, особенно из фторопласта Ф-4 (рис. 6 *a, б*).



Рис. 5. Импульсы:

a — прошедший через трубку с коническими утолщениями, когда она заполнена водой; *б* — прошедший через эту же трубку при отсутствии воды.

Таким образом, показана реальная возможность создания ультразвукового расходомера, работающего в непрерывном режиме. Следовательно, можно применить фазовую двухканальную схему изме-

рений. Целесообразно использовать три цилиндрических преобразователя: один из них должен создавать звуковые колебания, распространяющиеся в двух противоположных направлениях вдоль оси трубопровода; два других, — расположенных на одинаковом расстоянии по обе стороны от излучателя, должны быть приемниками.

Разность фаз звуковых колебаний, распространяющихся по потоку и против него, определяется выражением [7]:

$$\Delta\Phi = \omega(\tau_+ - \tau_-) \approx \frac{4\pi fl}{c^2} v,$$

где f — частота колебаний;

l — расстояние между излучающим и приемным пьезоэлементами;

c — скорость звука;

v — скорость потока;

τ_+ , τ_- — время распространения звуковых колебаний по потоку и против него.

Максимальное расстояние между преобразователями выбирается, исходя из величины наибольшей частоты пульсаций скорости потока, которую необходимо фиксировать. Половина длины волны регистрируемой пульсации должна быть больше, чем база датчика, т. е. расстояние между крайними преобразователями. Если принять, что пульсация создается за счет колебательной скорости частиц среды в низкочастотной звуковой волне, то при частоте 5 кгц и скорости звука 1500 м/сек база измерительной части звукопровода должна быть не больше 15 см . При максимальной средней скорости потока 1 м/сек и рабочей частоте 230 кгц фазовый сдвиг получается $5,4^\circ$. Точность измерения разности фаз обычными схемами составляет около $0,5^\circ$. Следовательно, относительная погрешность измерения расхода жидкостей оказывается очень большой. Для уменьшения этой погрешности следует применять умножение частоты и проводить измерение разности фаз на высокой частоте порядка 3 Мгц .

На основании приведенных соображений выбрана блок-схема расходомера (рис. 7), в которую входят: 1 — генератор; 2 — измерительный датчик; 3 и 4 — усилители; 5 и 6 — умножители частоты; 7 и 8 — высокочастотные усилители; 9 и 10 — ограничители; 11 — фазовый детектор; 12 — измерительная мостовая схема; 13 — квадратичный детектор; 14 — индикатор.

Генератор собран по схеме с емкостной обратной связью на лампе 6Ж5П.

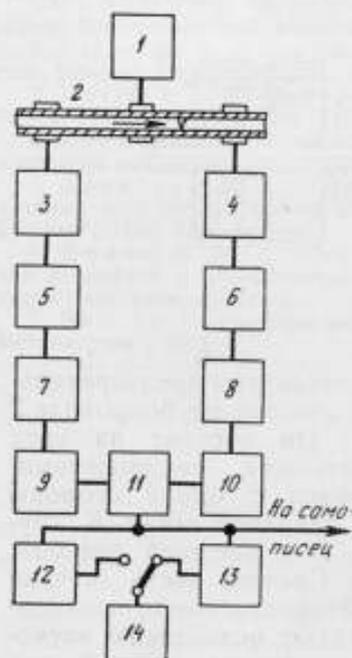


Рис. 7. Блок-схема расходомера.

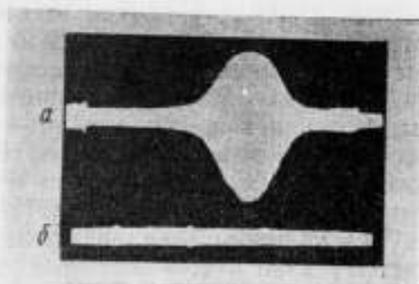


Рис. 6. Импульсы:

a — прошедший через фторопластовую трубку, наполненную водой; b — то же без воды.

В нем предусмотрена кварцевая стабилизация частоты. Колебания с частотой 230 кГц усиливаются в усилителе мощности, собранном на лампе 6П15П, и подаются на излучатель.

Сигналы с пьезоприемников поступают на входы двух идентичных приемно-усилительных каналов. Вначале сигналы усиливаются двухкаскадными резонансными усилителями, настроенными на частоту 230 кГц. Первые каскады выполнены по каскадной схеме на двух лампах 6Ж9П, включенных триодами. Вторые каскады — обычные резонансные усилители — собраны на пентодах 6Ж9П. Затем частота умножается на 13 путем отсечки анодного тока и выделения соответствующей гармоники в резонансных контурах умножителей, выполненных на лампах 6Ж9П. После этого сигналы усиливаются двухкаскадными резонансными усилителями, настроенными на частоту 2990 кГц, в которых также использованы пентоды 6Ж9П. В этих усилителях предусмотрены фазовращатели, представляющие собой длинные линии с отводами, необходимыми для компенсации начальных фазовых сдвигов.

Далее сигналы подаются на ограничители, собранные на двойных триодах 6НЗП, и затем поступают на балансный фазовый детектор. Через интегрирующую цепочку полезный сигнал, пропорциональный разности фаз колебаний, прошедших через два канала расходомера, подается на одну из управляющих сеток двойного триода 6НЗП. Между катодными нагрузками триодов включен микроамперметр М-24, по которому и производится отсчет. Кроме этого, полезный сигнал через разделительный конденсатор подается на квадратичный детектор, позволяющий определить величину переменной составляющей разности фаз. Последняя характеризует пульсации потока, для детального изучения которых должны использоваться дополнительные регистрирующие приборы: осциллограф и самописец, подключаемые к специальным гнездам. Сигнал на эти гнезда подается через катодный повторитель, собранный на лампе 6Ж5П.

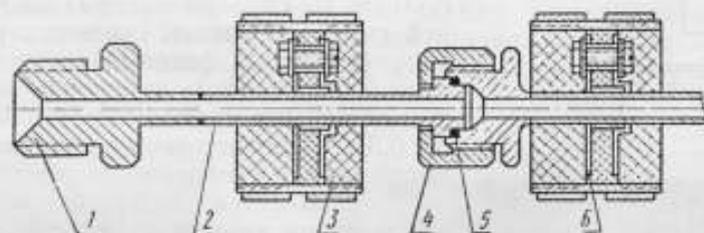


Рис. 8. Конструкция измерительного датчика.

В конструкции датчика также учтены результаты предварительных экспериментов (рис. 8). Измерительный участок трубопровода 2 выполнен из нержавеющей стали 1Х18Н9Т. Он состоит из трех частей, скрепленных стандартными ниппельными соединениями. Каждая из двух крайних трубок заканчивается с одной стороны утолщением, которое является упором для накидной гайки. К другой стороне этих трубок приварен штуцер 1 с внешней резьбой. Накидная гайка 4 навинчивается на штуцер. Средняя часть датчика заканчивается с обеих сторон штуцерами. Фторопластовые прокладки 5 и уплотнители между узлами способствуют ослаблению звукового сигнала, идущего по стенке. Резкие изменения сечений при переходах от штуцеров к трубкам также ослабляют акустическую

помеху. Кроме того, с двух сторон от преобразователей трубопровод покрыт эпоксидной смолой с наполнителем 3. Все эти меры оказываются достаточными для подавления сигнала, распространяющегося по стенке.

Контакты, через которые осуществляется передача напряжений на преобразователи, выполнены в виде колец 6. К ним подключены отрезки кабелей, заканчивающиеся высокочастотными разъемами. Преобразователи и контакты покрыты эпоксидной смолой, что обеспечивает герметичность электрических соединений.

Описанная конструкция измерительного датчика выдерживает давление до 500 ат и может быть использована в магистралях, предназначенных для агрессивных жидкостей.

Поскольку в данной конструкции отсутствует преломление, выполнить автоматическую температурную компенсацию в том виде, в каком она описана в работе [6], нельзя. Поэтому заранее составлены номограммы для перевода показаний регистраторов в значения расхода или скорости потока для некоторых конкретных жидкостей с учетом изменения скорости звука от температуры и давления. При этом учтены отклонения скорости звука в трубе по сравнению с условиями свободного пространства. Несимметрия акустических каналов может быть сведена к минимуму, так как расстояния между преобразователями легко измерить. В случае датчиков с преломлением это сделать трудней. В остальном погрешности, возникающие при измерениях, аналогичны погрешностям в обычных расходомерах.

Предварительные испытания, проведенные на специальном гидростенде, показали, что относительная погрешность измерения среднего расхода не превышает 3% от максимальной величины 0,03 л/сек.

ЛИТЕРАТУРА

1. Farral W. R. Design Consideration for Ultrasonic Flowmeters. „IRE Trans. on Medical Electronics“ 1959, v ME-6 XII, № 4, p 198—201.
2. Plass K. G. A New Ultrasonic Flowmeter for Intravascular Application. „IEEE Trans. Bio-Med Engng“ 1964, 11, № 4, 154—156.
3. Harrick J. F., Anderson J. A. An Ultrasonic Flow Meter. „IRE Trans. on Medical Electronics“, v ME-6, XII, № 4, p 195—197.
4. Колмаков В. А., Кипнис И. А. Акустический измерительный преобразователь малых расходов жидкостей. Авт. свид. СССР, № 221405, 1968.
5. Алексеев В. К., Ленендин Л. Ф., Колмаков В. А. Возбуждение звуковых волн внутри полого цилиндра пульсирующим кольцом. Сб. „Прикладная акустика“, 1968, № 1.
6. Дюдин Б. В., Кипнис И. А., Колмаков В. А. Об измерении расхода жидкостей в трубопроводах малого диаметра с помощью ультразвука. VI Всесоюзная акустическая конференция, М., 1968.
7. Биргер Г. И., Бражников Н. И. Ультразвуковые расходомеры. М., „Металлургия“, 1964.

ИМПУЛЬСНЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ МАЛЫХ ПОТОКОВ ЖИДКОСТЕЙ

При моделировании технологических схем химических, гидро-металлургических и других производств, а также при управлении промышленными технологическими процессами одной из наиболее актуальных задач является непрерывный контроль скорости потока и объемного расхода жидкостей. Для ряда сред, характеризующихся повышенной вязкостью, температурой, давлением и агрессивностью контроль параметров потоков жидкости затруднителен, а подчас и неосуществим общепринятыми методами и стандартными приборами.

В последнее время в СССР и за рубежом предпринят ряд попыток разработать устройства для контроля потоков жидкостей ультразвуковым методом. Метод основан на явлении изменения времени распространения ультразвуковой волны по потоку и против потока жидкости. Осуществить распространение волн одновременно по потоку и против него можно установкой двух пар пьезоэлементов, два из которых излучают, а два принимают ультразвуковые колебания. Такая схема построения акустического измерительного преобразователя характерна для двухканального расходомера. Однако здесь в процессе эксплуатации, как показывают теория и практика [1, 2], возможно появление разницы во времени распространения не за счет контролируемого потока жидкости, а за счет изменения пути и условий распространения вследствие неравномерной температуры, неодинакового истирания стенок трубопровода и других технологических причин. Эта дополнительная разница времен распространения ультразвуковых волн может быть значительной, что приводит к существенным погрешностям измерений.

Поэтому для указанных задач целесообразно применять расходомеры не с двумя акустическими каналами, а с одним, где распространение волны и по потоку, и против него происходит по одному пути. Тогда дополнительная разность во временах распространения ультразвуковых волн отсутствует. Разность времен распространения ультразвуковых волн, вызванная потоком, в одноканальных расходомерах одинаково успешно может быть определена фазовыми и импульсными методами, так как по чувствительности они примерно равновалены.

Несмотря на значительную перспективность промышленного использования, в особенности для регистрации малых расходов, одноканальные импульсные ультразвуковые методы контроля потоков жидкостей пока не получили широкого применения. Известны лишь

две разработки одноканальных расходомеров с применением импульсных ультразвуковых колебаний, первую из которых осуществили в 1958 г. [3]. Импульсный генератор вырабатывает короткие импульсы, попеременно возбуждающие два пьезоэлемента акустического измерительного преобразователя расхода. В нечетные периоды один из пьезоэлементов излучает ультразвуковой импульс против потока через промежуток времени τ_{-v} поступающий на другой пьезоэлемент, последний принимает его и преобразует в электрический импульс. Одновременно с возбуждением пьезоэлемента запускается зарядное устройство и начинается линейный заряд измерительного конденсатора, который через промежуток времени τ_{-v} обрывается принятым ультразвуковым импульсом. При этом амплитуда пилообразного напряжения U_{-v} на конденсаторе равна $k\tau_{-v}$ (k — коэффициент пропорциональности).

В четных периодах коммутируется направление излучения и аналогично производится линейный заряд другого измерительного конденсатора, на котором амплитуда пилообразного напряжения U_{+v} становится равной $k\tau_{+v}$, т. е. она пропорциональна времени распространения импульса по потоку. Разность напряжений на измерительных конденсаторах измеряется специальным измерительным устройством и служит мерой расхода Q :

$$U_{-v} - U_{+v} = k(\tau_{-v} - \tau_{+v}) = k_1 Q, \quad (1)$$

где k_1 — коэффициент пропорциональности.

Причинами нестабильности измерений таким методом могут быть флюктуации зарядного тока и температурные изменения емкостей зарядных конденсаторов. Требуемое здесь поддержание стабильности тока и емкости порядка 10^{-5} практически невыполнимо для промышленного прибора. Ввиду этого было использовано зарядное устройство с одним и тем же измерительным конденсатором, переключаемым попеременно при излучении по потоку и против потока. Однако при этом появилась новая погрешность, обусловленная нестабильностью периодов переключения, которая достигала величины, неприемлемой для ультразвукового расходомера непрерывного действия.

В Государственном научно-исследовательском институте теплоэнергетического приборостроения (НИИТеплоприбор) разработан одноканальный ультразвуковой расходомер [4]. В нем также периодически изменяется направление распространения ультразвуковых импульсов, но измеряются частоты автоциркуляции импульсов по потоку и против потока. Автоциркуляция создается путем синхронизации импульсного генератора, возбуждающего излучатель импульсом приемного пьезоэлемента. При этом период коммутации не может быть близким ко времени распространения импульсов из-за необходимости усреднения результатов измерения разности частот автоциркуляции импульсов по потоку и против потока.

Невысокая скорость коммутации может привести к появлению акустической асимметрии условий распространения ультразвуковых сигналов вследствие изменения давления, состава или температуры в контролируемом потоке в разных тактах коммутации. Другим недостатком является значительная инерционность измерений расхода, вызванная малыми величинами разности частот автоциркуляции импульсов.

Авторами предложен и разработан новый импульсный одноканальный метод без коммутации направления распространения

ультразвуковых импульсов, реализованный в научно-исследовательском институте редких металлов (Гиредмет) при разработке аппаратуры для контроля малых потоков гидрометаллургических жидкостей. Сущность метода заключается в одновременном излучении обоими пьезоэлементами коротких ультразвуковых импульсов навстречу друг другу (по потоку и против потока) с последующим приемом этих импульсов, сдвинутых во времени относительно друг друга на величину, пропорциональную контролируемому расходу, и измерении этого временного сдвига. Метод имеет две разновидности, в одной

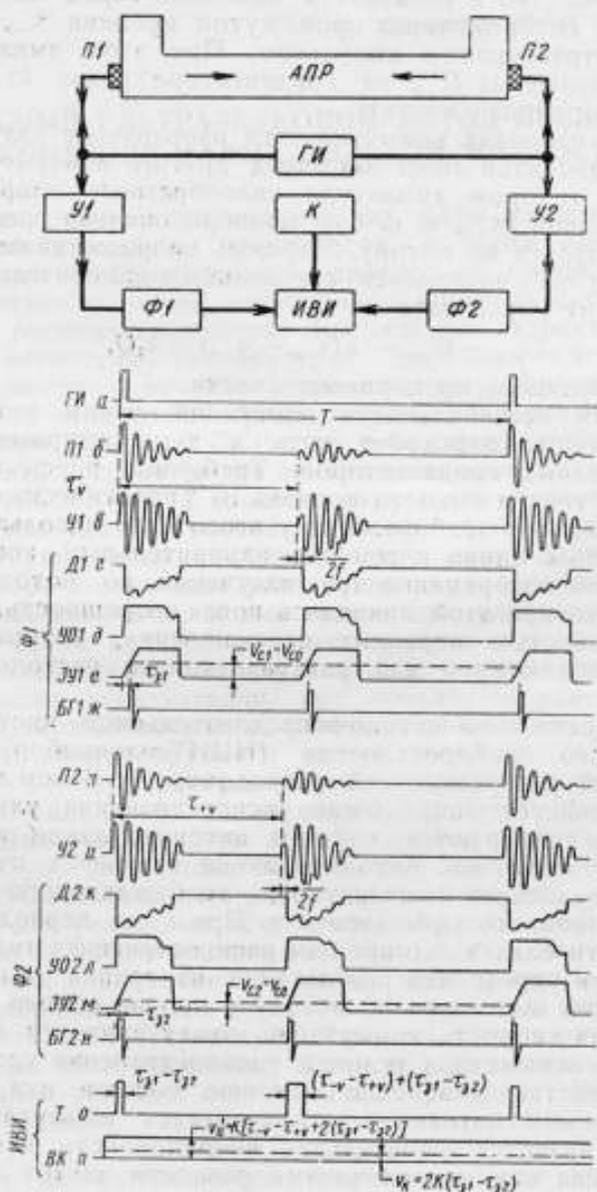


Рис. 1. Блок-схема импульсного ультразвукового расходомера с компенсацией импульсов и диаграммы напряжений в основных блоках схемы.

из которых применена компенсация проникающих в измерительную схему импульсов генератора, а в другой — блокирование, которым исключается их воздействие на измерения.

Метод с компенсацией импульсов генератора, воздействующих на измеритель временных интервалов, может быть реализован по схеме, показанной на рис. 1.

Пьезоэлементы $П1$ и $П2$, возбуждаемые видеоимпульсами генератора $ГИ$ (рис. 1а), одновременно излучают короткие ультразвуковые импульсы навстречу друг другу. Один из импульсов, например, излученный пьезоэлементом $П1$, распространяется против потока, а другой (излученный пьезоэлементом $П2$) — по потоку.

Импульсы, прошедшие контролируемую жидкость в трубопроводе диаметром d , длиной L , поступают на пьезоэлементы с временным сдвигом $\Delta\tau$ сек относительно друг друга (рис. 1б, з), пропорциональным скорости потока и, соответственно, контролируемому объемному расходу Q л/ч:

$$\Delta\tau = \tau_{-v} - \tau_{+v} = \frac{l}{0,45\pi R c^2} = Q, \quad (2)$$

где c — скорость ультразвука в жидкости в см/сек.

Электрические импульсы (см. рис 1 в, и), преобразованные пьезоэлементами из принятых ультразвуковых, вместе с возбуждающими импульсами генератора $ГИ$ через усилители $У1$ и $У2$ поступают на формирователи $\Phi1$ и $\Phi2$, которые вырабатывают из них короткие пусковые импульсы (см. рис. 1б, ж, и), запускающие измеритель временных интервалов $ИВИ$. Каждый из формирователей (рис. 2)

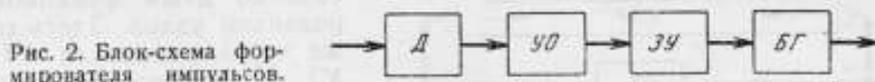


Рис. 2. Блок-схема формирователя импульсов.

состоит из детектора $Д$, усилителя-ограничителя $УО$, задерживающего узла $ЗУ$ и ждущего блокинг-генератора $БГ$. На детекторы с усилителей $У1$ и $У2$ поступают импульсы излучения и принятые импульсы, детектируемые (см. рис. 1б, з, к) с полярностью, обратной полярности возбуждающего импульса (см. рис. 1а). При этом детектированные импульсы сдвинуты относительно начала переднего фронта ультразвуковых импульсов на полупериод $1/2f$ ультразвуковых колебаний, а между детектированными импульсами излучения и приема сохраняется тот же временной интервал (τ_{+v} или τ_{-v}), что и между ультразвуковыми импульсами (см. рис. 1б, з).

Детектированные импульсы усиливаются и ограничиваются по амплитуде (см. рис. 1 д, л) и поступают на задерживающие узлы $ЗУ$, которые вырабатывают импульсы с заданной крутизной переднего фронта (см. рис. 1 е, м), поступающие на ждущие блокинг-генераторы $БГ$, запертые напряжением смещения U_{c1} , определяющим задержку их запуска. Задержка τ_{z1} формирователя $\Phi1$ выбрана большей, чем в формирователе $\Phi2$. Их разность, пропорциональная разности $U_{c1} - U_{c2}$ напряжений смещения, установлена из соотношения, обеспечивающего стабильность режима триггера в измерителе временных интервалов:

$$\tau_{z1} - \tau_{z2} > \tau_0, \quad (3)$$

где τ_0 — минимально возможный измеряемый временной интервал триггера, определяемый его разрешающей способностью.

Пусковые импульсы, формируемые из импульсов генератора, вызывают срабатывание триггера, который выдает на выходной каскад *ВК* импульсы длительностью $\tau_{s1} - \tau_{s2}$. Пусковые импульсы, формируемые принятыми импульсными сигналами, вызывают образование на выходе триггера импульсов (рис. 1 *о*) длительностью

$$\Delta\tau = \tau_{-v} - \tau_{+v} + \tau_{s1} - \tau_{s2}. \quad (4)$$

Выходной каскад *ВК* преобразует поступающие на него импульсы триггера в напряжение U_Q постоянного тока, пропорциональное их длительности:

$$U_Q = k[\tau_{-v} - \tau_{+v} - 2(\tau_{s1} - \tau_{s2})]. \quad (5)$$

Подаваемое с компенсатора *К* напряжение с полярностью, противоположной U_Q , компенсирует составляющую, обусловленную наличием задержки и проникновением импульсов генератора. При этом выходное напряжение U (рис. 1 *н*), поступающее на регистрирующий прибор *РП*, пропорционально временному интервалу между принятыми ультразвуковыми импульсами и, следовательно, контролируемому расходу:

$$U = k(\tau_{-v} - \tau_{+v}) = k_1 Q. \quad (6)$$

Схема реализации разновидности метода с блокированием импульсов генератора, воздействующих на измеритель временных интервалов, приведена на рис. 3. Она отличается от первой наличием модулирующего каскада *МК* и несколько иным функционированием узлов. Здесь также через усилители *У1* и *У2* на формирователи $\Phi 1$ и $\Phi 2$ поступают импульсы генератора и электрические импульсные сигналы, преобразованные пьезоэлементами *П1* и *П2* из принятых ультразвуковых импульсов, прошедших в акустическом преобразователе *АПР* по потоку и против него. Однако на время излучения формирователи блокируются импульсами модулирующего

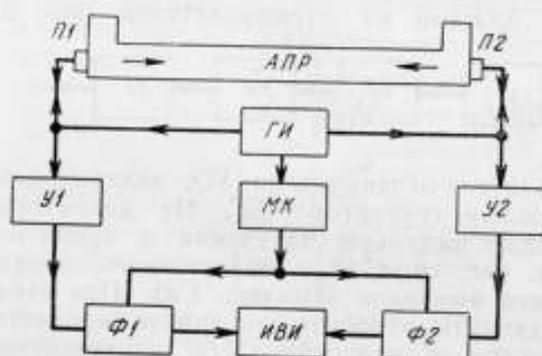


Рис. 3. Блок-схема импульсного ультразвукового расходомера с блокированием импульсов генератора.

каскада *МК*, запускаемого генератором *ГН* одновременно с возбуждением пьезоэлементов *П1* и *П2*. В результате формирователи вырабатывают пусковые импульсы, управляющие измерителем временных интервалов, только при воздействии принятых сигналов и не реагируют на импульсы генератора.

Разработанный метод, по сравнению с известными [1—4], обладает рядом преимуществ. Наиболее важное преимущество — улучшение условий симметрирования совмещенных акустических каналов и безынерционность прямого измерения разности времен распространения ультразвуковых импульсов по потоку и против него. Благодаря этому к электронной схеме предъявляются менее жесткие требования, что позволяет построить ее на стандартных узлах электронной аппаратуры.

На основе этого метода в институте Гиредмет были сконструированы опытные образцы ультразвуковых расходомеров по описанным выше схемам, позволяющие осуществлять исследование и контроль потоков в трубопроводе диаметром 10 мм при расходе, составляющем десятки литров в час. Стендовые испытания расходомеров на воде и четыреххлористом углероде дали положительные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биргер Г. И., Бражников Н. И. Ультразвуковые расходомеры. М., «Металлургия», 1954.
2. Биргер Г. И., Бражников Н. И. Состояние работ в области ультразвуковых расходомеров и приборы разработки КБ «Цветметавтоматика». Сб. докладов на Всесоюзной конференции по измерению расхода. М., Изд. ОНТИПрибор, 1955.
3. Franklin D. L., Rushmer R. F., Baker D. W., Ellis R. M. A Pulsed Ultrasonic Flowmeter. „JRE Trans. on Medical Electronics“, 1959, vol. Me-6, № 4, p. 204.
4. Журавлев Л. И. Способ исключения влияния паразитных отражений в акустических каналах частотно-импульсных ультразвуковых расходомеров. Авт. свидетельство СССР, № 157807, 1962.

ПРЕЦИЗИОННЫЕ ВТОРИЧНЫЕ УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ МГНОВЕННОГО РАСХОДА С УНИФИЦИРОВАННЫМ ТОКОВЫМ ВЫХОДОМ

При измерении мгновенных расходов жидкостей и газов довольно часто возникает необходимость в измерении частоты, например, когда мгновенный расход контролируется при помощи турбинных и шариковых расходомеров.

Для измерения частоты в расходомерии наибольшее распространение получили преобразователи частоты в постоянное напряжение (ток), однако они не всегда отвечают требованиям, предъявляемым в настоящее время к устройствам данного типа.

В статье описаны вторичные преобразователи, позволяющие с высокой точностью измерять мгновенный расход, предварительно преобразованный при помощи первичных преобразователей в последовательность импульсов (частоту) электрических напряжений.

Рассматриваются устройства двух групп:

первая — предназначена для измерения расходов, предварительно преобразованных в частоту выше 5 гц,

вторая — объединяет вторичные устройства, позволяющие измерять расходы с высоким быстродействием и точностью, предварительно преобразованные в частоту ниже 5 гц.

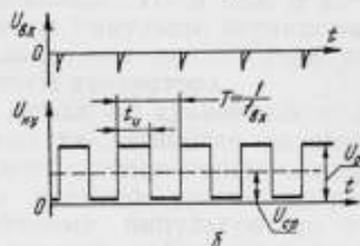
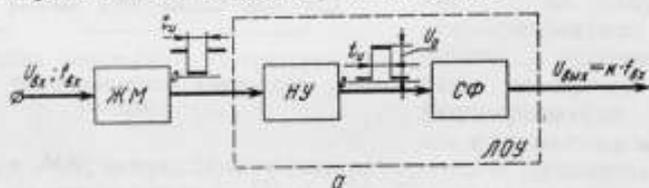


Рис. 1.

a — блок-схема преобразователя частоты; *b* — постоянная составляющая последовательности импульсов.

Устройства первой группы представляют собой преобразователи частоты в постоянное напряжение и состоят из ждущего мультивибратора, выходные импульсы которого осредняются линейным осредняющим устройством [1].

Блок-схема такого устройства приведена на рис. 1 а.

Входные импульсы, следующие с частотой $f_{вх}$, запускают ждущий мультивибратор ЖМ. На выходе ЖМ образуется последовательность импульсов постоянной длительности t_n , определяемой параметрами ждущего мультивибратора. Выходные импульсы ждущего мультивибратора поступают на вход линейного осредняющего устройства ЛОУ, состоящего из нормирующего устройства НУ и сглаживающего фильтра СФ. На выходе нормирующего устройства получаем последовательность прямоугольных импульсов со стабильной длительностью t_n и амплитудой U_0 , частота следования которых равна частоте входного напряжения.

Сглаживающий фильтр СФ производит выделение постоянной составляющей этой последовательности импульсов (рис. 1 б).

С целью увеличения выходного напряжения преобразователя при высокой линейности выходной характеристики ждущий мультивибратор выполнен по специальной схеме и имеет весьма малое время восстановления, не превышающее 0,5% от длительности выходного импульса [2].

Схема преобразователя приведена на рис. 2.

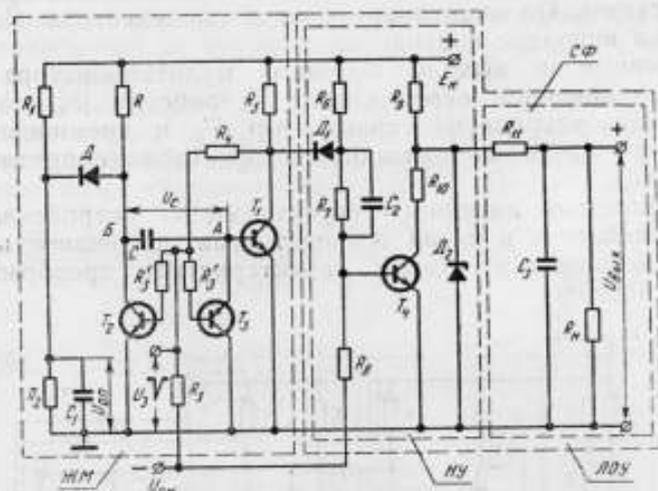


Рис. 2. Схема преобразователя.

Ждущий мультивибратор выполнен на транзисторах T_1-T_3 и работает следующим образом.

В исходном состоянии транзистор T_1 заперт, а транзисторы T_2 и T_3 насыщены базовым током, проходящим через сопротивления R_6 , R_4 и R_3 .

Напряжение на базе транзистора T_1 (в точке А), равное напряжению на эмиттере насыщенного транзистора T_3 , близко к нулю, что и обеспечивает надежное запирающее транзистора T_1 .

Напряжение в точке В, равное напряжению на коллекторе насыщенного транзистора T_2 , также близко к нулю. Поэтому напря-

жение U_c между обкладками времязадающего конденсатора C , равное разности напряжений в точках A и B , приблизительно равно нулю и мало изменяется с изменением температуры. Поскольку напряжение на катоде диода D , равное выходному напряжению $U_{\text{он}}$ делителя R_1-R_2 , более положительно, чем напряжение на его аноде, диод D заперт. Отрицательный запускающий импульс U_z одновременно подается на базы транзисторов T_2 и T_3 , запирая их. Конденсатор C начинает заряжаться по цепи: источник питания E_x , времязадающее сопротивление R , переход эмиттер — база транзистора T_1 . Ток заряда конденсатора, являясь базовым током транзистора T_1 , переводит этот транзистор в состояние насыщения, вследствие чего схема остается в неустойчивом состоянии и после прекращения запускающего импульса U_z .

По мере заряда конденсатора C напряжение на его обкладках, а следовательно, и в точке B возрастает. Когда напряжение U_B становится равным напряжению $U_{\text{он}}$, диод D отпирается, напряжение в точке B больше не увеличивается, зарядный ток конденсатора, являющийся базовым током транзистора T_1 , уменьшается, транзистор T_1 запирается. Запирание транзистора T_1 вызывает увеличение выходного напряжения ждущего мультивибратора до первоначального значения, что приводит к отпираанию транзисторов T_2 и T_3 . Конденсатор C весьма быстро разряжается через транзисторы T_2 и T_3 до исходного напряжения, что и обеспечивает малое время восстановления схемы. По окончании разряда конденсатора C схема возвращается в исходное состояние.

Полученные на выходе ждущего мультивибратора импульсы подаются на линейное осредняющее устройство [3], состоящее из нормирующего устройства (транзистор T_4 и кремниевый опорный стабилитрон D_2) и сглаживающего фильтра (сопротивление R_{11} и емкость C_3).

Особенностью линейного осредняющего устройства является высокая линейность и малая температурная погрешность. Отклонение от линейности выходной характеристики преобразователя не превышает 0,025%.

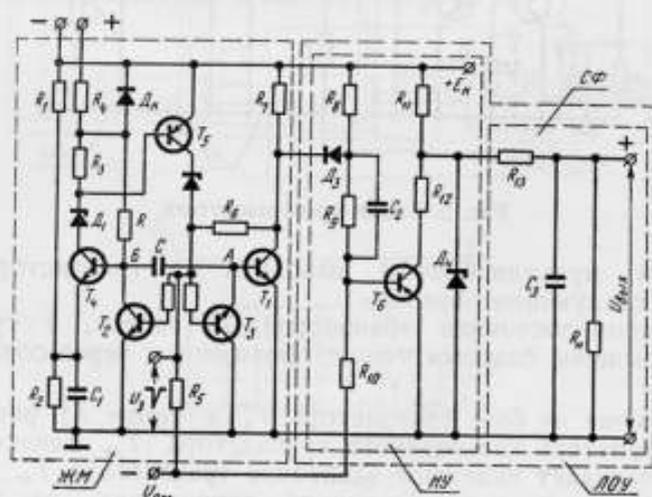


Рис. 3. Схема преобразователя.

Дополнительная температурная погрешность преобразователя определяется изменением температурой длительности импульса ждущего мультивибратора и не превышает 0,18% на каждые 10°C в диапазоне температур $\pm 60^\circ\text{C}$.

Для уменьшения температурной погрешности преобразователя в качестве ждущего мультивибратора в нем можно применить стабильный ждущий мультивибратор с малым временем восстановления [2].

Схема такого преобразователя приведена на рис. 3.

Ждущий мультивибратор в данной схеме выполнен на транзисторах T_1-T_5 .

В отличие от ждущего мультивибратора (рис. 2) в стабильном ждущем мультивибраторе (рис. 3) вместо сравнивающего диода применен сравнивающий усилитель, выполненный на транзисторах T_4-T_5 . Благодаря введению сравнивающего усилителя удастся практически полностью исключить влияние изменения коэффициента усиления по току β транзистора T_1 на длительность выходного импульса ждущего мультивибратора.

Изменения длительности выходного импульса ждущего мультивибратора, вызванные изменением с температурой напряжений на эмиттерных переходах транзисторов T_1 и T_4 , компенсируются изменениями напряжения на диоде D_x , через который задается прямой ток.

Температурная погрешность преобразователя, выполненного по схеме, приведенной на рис. 3, не превышает 0,025% на каждые 10°C в диапазоне температур $\pm 60^\circ\text{C}$.

Отклонение от линейности выходной характеристики преобразователя, выполненного по схеме рис. 3, не превышает, как и для схемы рис. 2, 0,025%.

Повышение коэффициента заполнения осредняемых импульсов, благодаря применению ждущих мультивибраторов с малым временем восстановления, позволило повысить выходную мощность по сравнению с известными устройствами такого типа.

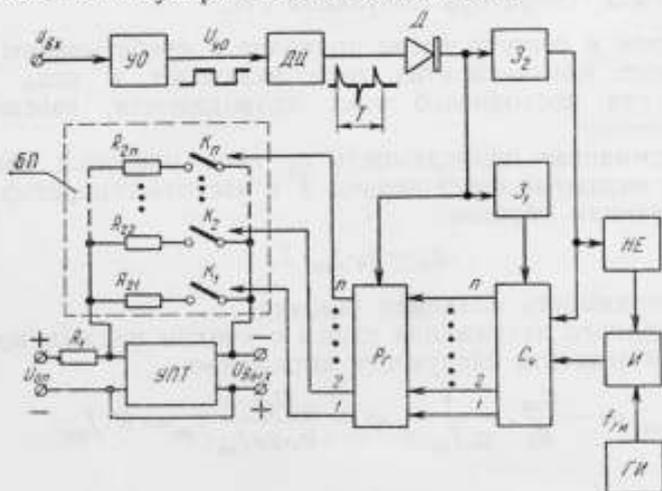


Рис. 4. Блок-схема преобразователя.

Вторая группа устройств предназначена для работы с низкочастотными первичными измерительными преобразователями расхода, это — быстродействующие инфранизкочастотные частотомеры [4].

Принцип работы таких устройств основан на измерении периода инфранизкочастотного сигнала и преобразовании его в постоянное напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала.

Блок-схема преобразователя приведена на рис. 4.

Основными узлами схемы являются генератор импульсов *ГИ*, счетчик *Сч*, регистр *Рз*, блок проводимостей *БП* и усилитель постоянного тока *УПТ*.

С помощью усилителя-ограничителя *УО* и дифференцирующей цепочки *ДЦ* вырабатываются управляющие (положительные) импульсы, соответствующие началу (окончанию) периода исследуемого сигнала, которые управляют работой устройства.

Работа преобразователя происходит следующим образом. Управляющий импульс, соответствующий началу исследуемого периода, проходит через диод *Д*, задержку *З₁* на счетчик *Сч* и сбрасывает его в нулевое состояние. Поступающие после этого с генератора *ГИ* импульсы подсчитываются счетчиком *Сч* до прихода следующего управляющего импульса, соответствующего окончанию периода исследуемого напряжения. Этот импульс сбрасывает регистр *Рз* и запускает задержки *З₁* и *З₂*. Импульс на входе *З₁*, появляющийся после окончания переходных процессов в триггер регистра, передает число *N* из счетчиков в регистр. Импульсы на выходе *З₂* появляются после передачи нового числа в регистр и устанавливают счетчик в нулевое положение. Для предотвращения появления ложных показаний заполняющие импульсы с выхода *ГИ* в течение интервала времени, определяемого задержкой *З₂*, в счетчик не поступают, что осуществляется с помощью схемы запрета *НЕ* и схемы совпадения *И*.

Таким образом, из счетчика в регистр переносится число импульсов, пропорциональное измеряемому периоду входного напряжения:

$$N = f_{гн} \cdot T,$$

где *T* — период измеряемого напряжения;

f_{гн} — частота генератора импульсов *ГИ*.

Записанное в регистр число приводит к срабатыванию соответствующих реле. Контакты этих реле включают в цепь обратной связи усилителя постоянного тока проводимости, взвешенные по двойному закону.

Тогда суммарная проводимость *g₂* цепи обратной связи *УПТ* может быть выражена через период *T* и частоту генератора импульсов *f_{гн}* следующим образом:

$$g_2 = g_0 \cdot f_{гн} \cdot T,$$

где *g₀* — проводимость младшего разряда.

Для выходного напряжения схемы с учетом предыдущего выражения можно записать следующее выражение:

$$U_{вых} = - \frac{U_{оп}}{R_1} \cdot \frac{1}{g_0 \cdot f_{гн} \cdot T} = - \frac{U_{оп}}{R_1 \cdot g_0 \cdot f_{гн}} \cdot f_{гн} = K \cdot f_{гн},$$

где

$$K = - \frac{U_{оп}}{R_1 \cdot g_0 \cdot f_{гн}} = \text{const.}$$

Это напряжение на выходе схемы будет сохраняться до следующей перезаписи.

Так как устройство предназначено для измерения частоты в инфранизкочастотном диапазоне, то время, необходимое для преобразования периода в проводимость и сброса счетчика, не увеличивает погрешность измерения.

Результаты макетирования дали следующие данные: отклонение от линейности выходной характеристики в диапазоне частот 0,1—1 μz не превышает $\pm 0,1\%$; максимальное выходное напряжение на нагрузке в 1 $\text{k}\Omega$ составляет 10 в ; дополнительная температурная погрешность в диапазоне температур $\pm 60^\circ\text{C}$ не превышает $\pm 0,1\%$ на каждые 10°C .

ЛИТЕРАТУРА

1. Лейтман М. Б., Барьюдин Э. Л. „Приборостроение“, 1968, № 2.
2. Лейтман М. Б., Барьюдин Э. Л. Стабильный ждущий мультивибратор с малым временем восстановления. Авторское свидетельство СССР, № 196091, 1967.
3. Лейтман М. Б. Линейные фильтры для выделения постоянной составляющей импульсных напряжений в измерительных устройствах. М., ГОСИНТИ, 1967.
4. Лейтман М. Б., Барьюдин Э. Л. „Измерительная техника“, 1968, № 8.

ТРАНЗИСТОРНЫЕ СЧЕТНО-РЕШАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ КВАДРАТНОГО КОРНЯ С ТОКОВЫМ ВЫХОДОМ К РАСХОДОМЕРАМ

В расходомерах, работающих по принципу измерения перепада давлений, для линейаризации шкалы вторичного прибора необходимо осуществлять извлечение квадратного корня из величины выходного напряжения первичных измерительных преобразователей. Эта операция обычно реализуется либо с помощью специальных лекальных устройств, либо посредством применения диодных функциональных преобразователей, отличающихся невысокой термостабильностью и имеющих небольшой динамический диапазон преобразования.

В работе рассматриваются два транзисторных счетно-решающих устройства для извлечения квадратного корня из величины постоянного напряжения, в значительной степени свободные от указанных недостатков.

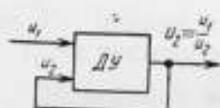


Рис. 1. Блок-схема делительного устройства.

Устройства выполнены по блок-схеме (рис. 1) и представляют собой [1] делительное устройство ДУ, осуществляющее деление входного напряжения U_1 на выходное напряжение U_2 этого же устройства. Для схемы рис. 1 можно записать

$$\frac{U_1}{U_2} = U_2,$$

откуда

$$U_2 = \sqrt{U_1}. \quad (1)$$

В первом устройстве [1] в качестве ДУ (рис. 2) использован ждущий мультивибратор с коллекторно-базовыми связями, в котором коллекторная цепь транзистора (T_1) питается делимым напряжением (U_1), а в цепь базы транзистора (T_2) через резистор R подводится напряжение (U_2), выполняющее роль делителя.

Ждущий мультивибратор запускается импульсами U_3 , с частотой следования 50 гц. Длительность импульсов t_n на выходе мультивибратора определяется выражением [2]

$$t_n = \tau \ln \left(1 + \frac{U_1}{U_2} \right) = \tau \ln (1 + X), \quad (2)$$

где

$$\tau = RC, \quad X = \frac{U_1}{U_2}.$$

При выполнении неравенства

$$U_1 \ll U_2 \quad (3)$$

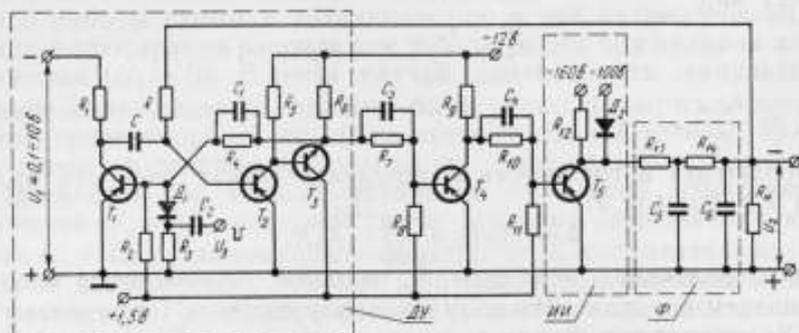


Рис. 2. Электросхема мультивибратора.

выражение (2) можно разложить в степенной ряд, ограничившись первым членом разложения:

$$t_n \approx \tau \frac{U_1}{U_2} = \tau X. \quad (4)$$

Следовательно, в этом случае управляемый мультивибратор может быть использован в качестве время-импульсного делительного устройства.

Выходные импульсы ДУ после инвертирования транзистором T_4 осредняются линейным фильтром постоянной составляющей [2], состоящим из источника импульсов UU и двухзвенного сглаживающего RC -фильтра Φ (см. рис. 2). Выходное напряжение U_2 фильтра, являющееся также и выходным напряжением схемы, подается в качестве делителя в схему ДУ.

Линейность выходной характеристики устройства во многом определяется точностью выполнения операции деления, которая повышается с усилением неравенства (2). Последнее, однако, требует увеличения U_2 по сравнению с U_1 , что не всегда удобно.

В связи с этим возникает необходимость в выборе такой величины отношения $\frac{U_1}{U_2}$, при которой погрешность, связанная с нелинейностью выходной характеристики устройства, не превышает заданной величины.

Оценим погрешность делительного устройства, возникающую вследствие отличия выходной характеристики $t_n = f\left(\frac{U_1}{U_2}\right) = f(X)$ от линейной. Зависимость $t_n = f(X)$, построенная в соответствии с формулой (2), показана на рис. 3 (кривая 1).

Будем считать, что абсолютная величина погрешности Δ , связанной с нелинейностью выходной характеристики ДУ, представляет собой разность ординат кривой 1 и прямой 2, которую назовем

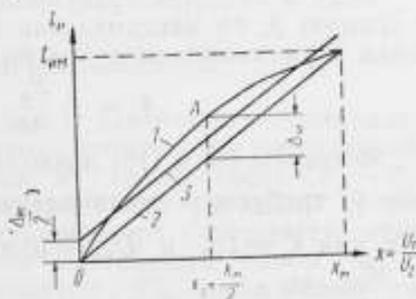


Рис. 3. Зависимость длительности импульсов от отношения напряжений.

градуировочной. Максимальную величину Δ_m эта погрешность имеет при $X = X_1$. Найдем величину Δ_m . Уравнение градуировочной прямой (1) имеет вид

$$t_m = \frac{t_{н.м}}{X_m} X = K_1 X, \quad (5)$$

где $K_1 = \frac{t_{н.м}}{X_m}$.

Абсолютная погрешность Δ определяется как разность ординат кривой 1 и прямой 2:

$$\Delta = \tau \ln(1 + X) - K_1 X. \quad (6)$$

Для определения величины Δ_m находим производную Δ по X и приравняем ее нулю. Из полученного уравнения определяем значение X_1 , которое, после подстановки в формулу (6), дает величину Δ_m . После преобразований получаем:

$$X_1 \approx \frac{X_m}{2}, \quad (7)$$

$$\delta_m = \frac{X_m}{8 + 2X_m} \approx \frac{X_m}{8}, \quad (8)$$

где $\delta_m = \frac{\Delta_m}{t_{н.м}}$ — максимальная приведенная погрешность делительного устройства, обусловленная нелинейностью его выходной характеристики.

В связи с нелинейностью выходной характеристики DV , выходная характеристика всего устройства также является нелинейной и имеет такой же вид, как кривая 1. Анализ показывает, что максимальная приведенная погрешность, связанная с нелинейностью выходной характеристики всего устройства δ'_m , вдвое меньше максимальной погрешности δ_m DV , т. е.

$$\delta'_m = \frac{\delta_m}{2} = \frac{X_m}{16 + 4X_m} \approx \frac{X_m}{16}. \quad (9)$$

Если в качестве градуировочной прямой считать не прямую 2, а прямую 3, то максимальная приведенная погрешность имеет оба знака и уменьшается вдвое по величине:

$$\delta_m \approx \pm \frac{X_m}{16}, \quad \delta'_m \approx \pm \frac{X_m}{32}. \quad (10)$$

Формулы (9) и (10) позволяют определить по заданному значению δ'_m требуемую минимальную величину отношения $X_m = \left(\frac{U_1}{U_2}\right)_m$. Так, при $\delta'_m = 1\%$ и $U_{1м} = 10$ в получаем: $X_m = 16\delta'_m = 0,16$, $U_{2м} = \frac{10}{0,16} \approx 60$ в.

Необходимо отметить, что в схеме рис. 2 ток базы транзистора T_2 , насыщающий составной транзистор $T_2 - T_3$ в устойчивом состоянии ждущего мультивибратора и равный $i_b \approx \frac{U_2}{R}$, может изменяться в широких пределах в процессе работы схемы вследствие изменения выходного напряжения схемы U_2 . Именно для обеспечения надежного насыщения при малых напряжениях U_2 второе плечо

мультивибратора выполнено в виде составного транзистора. Однако при малых выходных напряжениях составной транзистор все же выходит из состояния насыщения, что приводит к нарушению нормальной работы схемы и возникновению в ней автоколебаний.

Для иллюстрации рассмотрим работу схемы при нулевом входном напряжении ($U_1 = 0$). В этом случае длительность импульсов t_n и выходное напряжение U_2 должны быть равны нулю, из-за чего базовый ток транзистора T_2 не протекает и составной транзистор $T_2 - T_3$ будет заперт в течение всего периода. Это приводит к запираанию T_5 и появлению на выходе источника импульсов отрицательного напряжения $U_k \approx U_0$, под действием которого заряжаются конденсаторы $C_5 - C_8$ сглаживающего фильтра Φ и, следовательно, растет выходное напряжение U_2 схемы. При некотором значении U_2 составной транзистор $T_2 - T_3$ насыщается, вызывая насыщение транзистора T_5 . Конденсаторы сглаживающего фильтра Φ разряжаются через насыщенный транзистор и сопротивления фильтра, что приводит к уменьшению U_2 . Когда, вследствие этого, составной транзистор $T_2 - T_3$ выходит из состояния насыщения, транзистор T_5 вновь запирается, конденсаторы фильтра начинают заряжаться, напряжение U_2 вновь нарастает, и процесс повторяется. Недостатком схемы рис. 2 является, кроме того, необходимость иметь высоковольтный выход для выполнения неравенства (3).

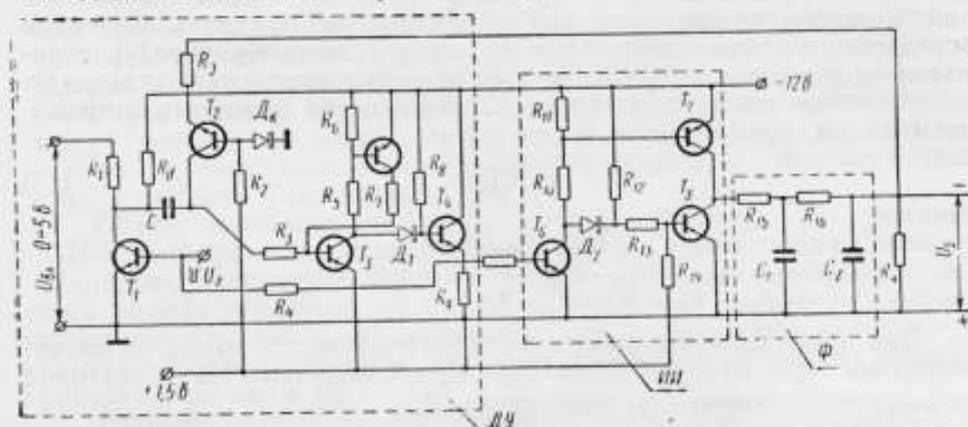


Рис. 4. Электросхема ждущего мультивибратора.

На рис. 4 приведена схема, свободная от указанных недостатков. В качестве делительного устройства вновь использован управляемый ждущий мультивибратор, выполненный на транзисторах $T_1 - T_5$. С целью повышения линейности схемы при малых выходных напряжениях, перезаряд времязадающего конденсатора C осуществляется при каждом значении U_2 практически постоянным током через токостабилизирующий элемент — транзистор T_2 , включенный по схеме с общей базой. Ток перезаряда I_c определяется выражением

$$I_c = \alpha \frac{U_2 - U_{эб_2} + U_{а.к}}{R_9} \approx \alpha \frac{U_2}{R_9}, \quad (11)$$

где $U_{эб_2}$ и $U_{а.к}$ — напряжения на открытом эмиттерном переходе транзистора T_2 и компенсирующем диоде D_4 , соответственно.

Второе плечо мультивибратора выполнено на транзисторах T_3-T_5 , причем, транзисторы T_3-T_4 образуют спусковую схему.

Благодаря наличию положительной обратной связи через сопротивление R_{x1} , транзистор T_3 поддерживается в насыщенном состоянии и при нулевом напряжении U_2 , когда ток через токостабилизирующий транзистор не протекает. Это исключает возможность возникновения автоколебаний в схеме при малых значениях U_2 . Транзистор T_5 является эмиттерным повторителем. Длительность t_n выходного импульса ждущего мультивибратора определяется временем, в течение которого напряжение на времязадающем конденсаторе C изменяется на величину $\Delta U_c \approx U_1$. Считая, что ток перезаряда конденсатора, определяемый выражением (11), за время перезаряда не изменяется, получим

$$t_n = \frac{\Delta U_c C}{I_c} \approx \frac{CR_2}{\alpha} \cdot \frac{U_1}{U_2} \quad (12)$$

Следовательно, длительность выходных импульсов ждущего мультивибратора пропорциональна отношению напряжений U_1 и U_2 . Источник импульсов ИИ фильтра постоянной составляющей ФПС выполнен на транзисторах T_6-T_8 и работает таким образом, что его внутреннее сопротивление во время импульса и паузы примерно одинаково и равно внутреннему сопротивлению насыщенного в данный момент транзистора. Это позволяет осуществить линейное осреднение выходных импульсов ждущего мультивибратора [3], которое производится с помощью двухзвенного сглаживающего фильтра Φ .

Выходное напряжение фильтра, являющееся выходным напряжением схемы, определяется выражением

$$U_2 = KV\overline{U_1}, \quad (13)$$

где

$$K = \frac{R'_n}{R_{15} + R_{16} + R'_n} \cdot E_x f \frac{CR_2}{\alpha} = \text{const}, \quad R'_n = \frac{R_n R_3}{R_n + R_3}$$

Для повышения линейности начального участка выходной характеристики при помощи резистора R_n устанавливается некоторое начальное напряжение на коллекторе T_1 .

Разработанные устройства имеют следующие характеристики.

Схема рис. 2: $U_1 = 0,1 \div 10$ в; $U_2 = 5 \div 50$ в, $\delta'_n \approx 1,5\%$.

Схема рис. 4: $U_1 = 0 \div 5$ в; $U_2 = 0 \div 10$ в, $\delta'_n \approx 1\%$.

Приведенная температурная погрешность обеих схем в диапазоне температур $20 \pm 5^\circ \text{C}$ при использовании в схеме ждущего мультивибратора кремниевых транзисторов не превышает $\pm 1\%$. Время установления выходного напряжения при скачкообразном изменении входного не превышает 0,3 сек и может быть уменьшено путем повышения частоты запускающих импульсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лейтман М. Б. Авторское свидетельство СССР, № 185593, 1965.
2. Лейтман М. Б. "Приборостроение", 1965, № 9.
3. Лейтман М. Б. Линейные фильтры для выделения постоянной составляющей импульсных напряжений в измерительных устройствах. М., ГОСИНТИ, 1967.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОТСЧЕТА КАЛИБРОВАННОГО ОБЪЕМА
В ТРУБОПОРШНЕВЫХ УСТАНОВКАХ

В последние годы в зарубежной практике (США, Франция и др.) находят широкое применение новые методы поверки счетчиков жидкостей и газов с помощью поверочных устройств, основанных на объемном способе вытеснения, именуемых трубопоршневыми установками (ТПУ). Они имеют измерительные камеры, представляющие определенные участки трубы, откалиброванные с высокой точностью по объему между двумя предельными отметками с помощью отсчетных устройств, называемых детекторными переключателями. Последние отсчитывают калиброванный объем путем выдачи электрического сигнала на исполнительные элементы электронной схемы, вместе с которой должны обеспечивать точное определение крайних положений поршня во время поверочного цикла и передачу сигналов в виде соответствующих электрических импульсов счетному устройству с высоким быстродействием.

Объем калиброванного участка ТПУ является его основной паспортной характеристикой и определяется с максимально высокой точностью путем аттестации. Точность отсчитываемого калиброванного объема в значительной степени зависит от точности срабатывания детекторных переключателей, что, в свою очередь, является их важнейшим параметром, от которого во многом зависит точность поверки счетчиков [5].

Размеры (длина) калиброванного участка ТПУ также зависят от точности срабатывания детекторных переключателей. Так, если погрешность срабатывания δ_1 одного из детекторных переключателей составит

$$\delta_1 = \pm 0,7 \text{ мм},$$

то при заданной точности отсчета длины калиброванного участка в 0,01%, его минимальная длина x будет равна:

$$\frac{1,0 - 0,01\%}{x - 100\%} x = \frac{1,0 \cdot 100}{0,01} \approx 10 \text{ м},$$

где 1,0 мм — суммарная погрешность δ_2 двух детекторов переключателей,

$$\delta_2 = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_1^2},$$

где δ_1 — погрешность второго детектора, $\delta_1 = \delta_1$.

Из примера видно, что, чем меньше погрешность срабатывания детекторных переключателей при одной и той же точности ТПУ,

тем меньше потребуются минимальная длина калиброванного участка [3].

Для обоснования выбора конструкции детекторных переключателей, предназначенных для разрабатываемых в Казанском филиале ВНИИФТРИ ТПУ, был проведен анализ характеристик детекторных переключателей, применяемых в стране и за рубежом.

Детекторные переключатели на известных зарубежных ТПУ — это преимущественно контактные электромеханические и бесконтактные индуктивные датчики [1, 2]. Электромеханические контактные переключатели работают на принципе перемещения штифта от взаимодействия с движущимся поршнем. Штифт вводится во внутреннюю полость трубы и при соприкосновении с поршнем, перемещаясь, оказывает давление на переключение контактов контактной пары. Недостатки этих переключателей — большая погрешность срабатывания, сложность в обслуживании и ограниченный срок службы.

Бесконтактные индуктивные детекторные переключатели основаны на принципе изменения индуктивного сопротивления при замыкании магнитной цепи якорем, закрепленным на поршне установки. Недостатками их являются: большая погрешность срабатывания, ограничивающая в целом точность трубопоршневой установки, отсутствие релейной характеристики выходного электрического сигнала, влияние питающего напряжения на точность срабатывания, большой вес управляющего ферромагнитного элемента, якоря, устанавливаемого на поршне, и наличие погрешностей, вызванных колебаниями величины воздушного зазора между якорем и статором в положении срабатывания.

Применение электронно-оптических переключателей при тщательном фокусировании луча может дать лучшие результаты по точности срабатывания, чем индуктивные, однако их использование приемлемо только при работе ТПУ на прозрачных средах.

Детекторные переключатели, основанные на использовании ультразвука, пока недостаточно изучены, сложны по устройству и регулировке электрической схемы. Изменения формы и положения элементов поршня, температуры, напряжения питания, сопротивления проводящих сред и другие факторы вызывают появление значительных по величине дополнительных погрешностей, в силу чего применяются редко.

Для уменьшения влияния и устранения отдельных недостатков детекторных переключателей нами разработано устройство для отсчета калиброванного объема в ТПУ с дифференциальной схемой управления воздушного зазора между якорем и статором в положении срабатывания детекторного переключателя с применением в качестве статора постоянных магнитов, а в качестве непосредственных чувствительных и исполнительных элементов — магнитоуправляемых контактов с высоким и стабильным коэффициентом возврата.

На рис. 1 схематически изображен общий вид устройства для отсчета калиброванного объема, смонтированного на диаметрально расположенных немагнитных участках трубы, с примыкающими постоянными магнитами.

На рис. 2 дан вид по сечению А — А.

Устройство включает в себя поршень 1, на котором закреплено ферромагнитное кольцо 2, движущееся в трубе 3. На трубе диаметрально с двух сторон ввариваются немагнитные вставки 4, на которых размещаются постоянные магниты 5, с установкой у одного

из них магнитоуправляемого контакта 6. Внешние полюсы магнитов замыкаются кольцевым магнитопроводом 7. Устройство защищено от внешних магнитных полей магнитным экраном 8. Магнитоуправляемый контакт устанавливается у одного из полюсов магнита, при-

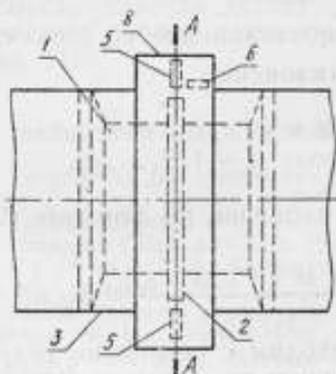


Рис. 1. Схема установки датчика импульсов.

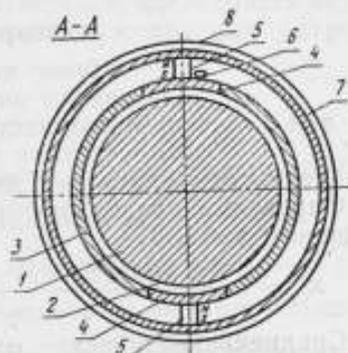


Рис. 2. Поперечное сечение датчика импульсов.

мыкающего к немагнитному участку трубы (вставке), в зоне напряженности магнитного поля, соответствующего полю срабатывания контактов реле. Кроме основных элементов, показанных на чертеже, устройство снабжается для его регулировки механизмом перемещения и фиксации магнитоуправляемого контакта.

Магнитоуправляемый контакт 6 в исходном положении замкнут. В момент прохождения поршнем 1 в зоне постоянных магнитов 5 ферромагнитное кольцо 2 (управляющий элемент), закрепленное на поршне, шунтирует магнитный поток полюсов этих магнитов, ослабляя тем самым внешнее магнитное поле, обуславливая при этом дифференциальную зависимость изменения воздушного зазора между якорем и статором. Ослабление внешнего магнитного поля должно быть таким, чтобы оно было равно или меньше магнитного поля отпущения контактов магнитоуправляемого контакта 6. Магнитоуправляемый контакт разрывает свои контакты и тем самым выдает сигнал в электронную схему.

При таком выполнении конструкции, как показали предварительные опыты на модели, значительно повышается точность срабатывания устройства для отсчета калиброванного объема в ТПУ при малом весе подвижного управляющего элемента.

С целью испытания в динамическом режиме детекторных переключателей с магнитоуправляемыми контактами, а также для их отбора с высоким и стабильным коэффициентом возврата, спроектирован, изготовлен и опробирован поверочный стенд. Результат предварительной оценки точности работы детекторных переключателей получен экспериментально путем статистического метода [7] на основании проведенных опытов с числом измерений $N = 100$.

Среднеквадратическое отклонение σ для полученного числа измерений определено по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N n_i (x_i - x_{cp})^2}{N-1}}, \quad (1)$$

где

$$x_{\text{cp}} = \frac{x_1 n_1 + x_2 n_2 + \dots + x_k n_k}{n_1 + n_2 + \dots + n_k} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i n_i}{N} \quad (2)$$

x_{cp} — среднеарифметическое отклонение из всех x ;

N — общее количество отклонений;

k — число интервалов;

$n_1 + n_2 + \dots + n_k$ — количество измерений в каждом интервале;

n_i — частота в i -ом интервале ($i = 1, 2, \dots, k$).

Результаты измерений даны в табл. 1.

Определим среднеарифметическое отклонение по формуле (2) и по данным табл. 1.

$$x_{\text{cp}} = \frac{5 \times 6 + 15 \times 26 + 25 \times 51 + 35 \times 10 + 45 \times 4 + 55 \times 3}{100} = 23,05.$$

Среднеквадратическое отклонение находим с помощью результатов, определенных в табл. 2 и вычислением по формуле (1):

$$\sum_{i=1}^k n_i (x_i - x_{\text{cp}})^2 = 10239,$$

$$\sigma = 10 \cdot \sqrt{\frac{10239}{99}} = 10 \times 10 \text{ мк} = 0,1 \text{ мм}.$$

Детекторные переключатели с контактными системами, помещенными в колбу с вакуумом, просты по конструкции и являются более совершенными, чем переключатели аналогичного назначения. Их износоустойчивость может достигать до 10^5 переключений, частота работы — 300 переключений в секунду, быстродействие до долей миллисекунды, вес управляющего элемента не превышает 25 г. Точность переключателей может быть повышена за счет совершенствования конструкции статора и якоря, позволяющих улучшить дифференциальность изменения воздушного зазора в положении срабатывания, а также за счет повышения и стабилизации коэффициента возврата магнитоуправляемых контактов [4, 6].

Таблица 1

Интервалы отклонений в мк × 10		Абсолютная частота отклонений
от	до	
0	10	6
10	20	26
20	30	51
30	40	10
40	50	4
50	60	3

Таблица 2

Отклонение в мк × 10		n_i	$x_i - x_{\text{cp}}$	$(x_i - x_{\text{cp}})^2$	$n (x_i - x_{\text{cp}})^2$
от	до				
0	10	6	-18,05	325	1950
10	20	26	- 8,05	65	1690
20	30	51	+ 1,95	3,8	194
30	40	10	+11,95	142	1425
40	50	4	+21,95	480	1920
50	60	3	+31,95	1020	3060

Таким образом, применение разработанного устройства для отсчета калиброванного объема в ТПУ позволяет:

повысить точность ТПУ, уменьшить длину калиброванного участка и в целом снизить габариты ТПУ, увеличить надежность и износоустойчивость детекторных переключателей, согласовать автоматическую работу детекторного переключателя с другими устройствами ТПУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Устройство для калибровки (поверки) расходомеров. Патент США, № 2772561, 1956.
2. Трубопоршневая поверочная установка. Патент США, № 3120118, 1964.
3. Стандарт США API-2531, 1963.
4. Срибнер Л. А. Бесконтактные путевые переключатели повышенной точности. М., «Энергия», 1967.
5. Новые приборы и оборудование на трубопроводном транспорте и нефтебазах за рубежом. М., Изд. ВНИИОЭНГ, 1966.
6. Агейкин Д. Н. Датчики контроля и регулирования. М., «Машиностроение», 1965.
7. Гаврилов А. Н. Технология авиационного приборостроения. М., Оборонгиз, 1962.

О ПОСТРОЕНИИ КОМПЕНСИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОЕМКОСТНЫХ ТОПЛИВОМЕРОВ

В современных самолетах особое значение приобретает точное измерение количества топлива в баках. Повышение точности измерения количества топлива позволит повысить безопасность полетов и увеличить их экономическую эффективность.

В настоящее время наиболее приемлем электроемкостный метод измерения запасов топлива, особенность которого состоит в том, что при погружении конденсаторного датчика в топливо его емкость увеличивается (1), так как диэлектрическая проницаемость топлива больше, чем у воздуха.

Емкость датчика C определяется выражением

$$C = C_0 \epsilon_n h_n + C_0 \epsilon_r H_r, \quad (1)$$

где C_0 — погонная емкость датчика;

ϵ_n, ϵ_r — диэлектрическая проницаемость воздуха и топлива;

h_n, H_r — высоты непогруженной и погруженной частей датчика

$$(h_n = L - H_r);$$

L — длина датчика.

Однако непостоянство диэлектрической проницаемости топлива от сорта к сорту и отклонение внутри одного сорта, а также при изменении температуры приводит к появлению методической погрешности измерения. В применявшихся ранее электроемкостных топливомерах эта погрешность составляла 8—10%. В настоящее время в эксплуатацию введен электроемкостный топливомер с температурной компенсацией, в котором методическая погрешность несколько уменьшена, но все же остается существенной. Как старые, так и новые топливомеры, к сожалению, имеют большие инструментальные погрешности из-за паразитных утечек в соединительных кабелях и датчиках.

Исследования показали, что методическая и инструментальная погрешности измерения массы (веса) топлива могут быть уменьшены до 1—2% при использовании составных емкостных датчиков и специальных измерительных схем, учитывающих взаимную связь физических и электрических свойств топлив. Под составным датчиком подразумевается комплект из рабочего и компенсационных емкостных датчиков, включенных в специальную измерительную схему.

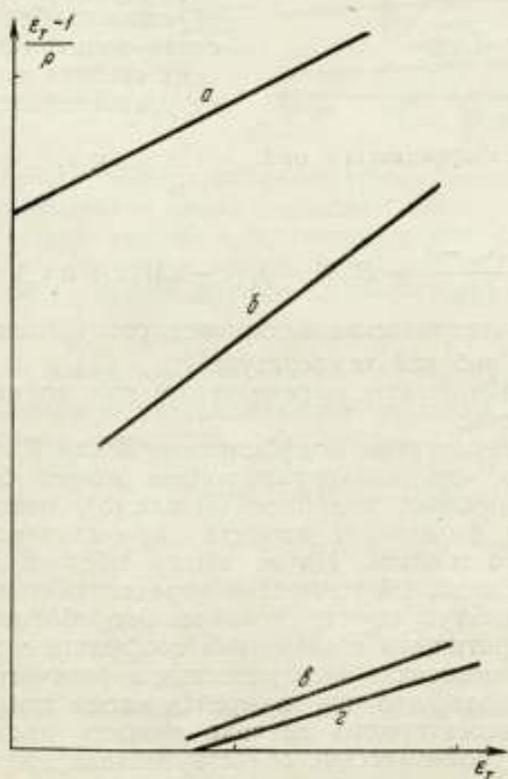
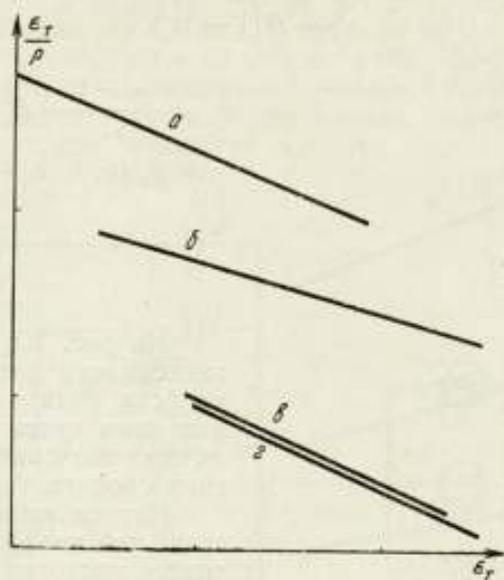


Рис. 1, 2. Графики зависимости электрофизических свойств некоторых топлив.

Взаимосвязь электрических и физических свойств топлив описывается выражениями:

$$\frac{\epsilon_r}{\rho} = B(1 - k\epsilon_r), \quad (2)$$

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\rho} = B_1(1 + k_1\epsilon_r), \quad (3)$$

где B, B_1, k, k_1 — коэффициенты, экспериментально определяемые для каждого сорта топлива.

На рис. 1 и 2 представлены зависимости электрофизических свойств ряда топлив, полученные нами путем обработки табличных значений электрофизических свойств топлив.

Исследования также показали, что коэффициент B не остается постоянным при изменении температуры и зависит от коэффициента k (рис. 3). Таким образом, наиболее точно взаимосвязь электрических и физических свойств топлив описывается уравнениями:

$$\frac{\epsilon_{rt}}{\rho_t} = B_0[1 - \beta(t - t_0)](1 - k\epsilon_{rt}), \quad (4)$$

$$\frac{\epsilon_{rt} - 1}{\rho_t} = B_{10}[1 - \beta_1(t - t_0)](1 + k_1\epsilon_{rt}), \quad (5)$$

где ϵ_{rt}, ρ_t — диэлектрическая проницаемость и плотность топлива при рабочей температуре t ;

B_0, B_{10} — коэффициенты, определяемые при нормальной температуре t_0 ;

β, β_1 — температурные коэффициенты B или B_1 .

Установлено, что для групп топлив может быть составлено обобщенное уравнение, подобное (4) или (5), описывающее связь электрических и физических свойств „нормализованного“ реально несуществующего топлива. Но по этому обобщенному уравнению можно с заранее заданной точностью определить свойства реального, входящего в принятую группу топлива. Это обобщенное уравнение оказывается не критичным к значениям коэффициентов B и k .

Учитывая взаимосвязь электрических и физических свойств топлив, можно показать, что при измерении массы топлива с помощью одиночного конденсаторного датчика емкость последнего зависит от массы и электрофизических свойств топлива при $\epsilon_n = 1$:

$$C = C_0L + \frac{C_0}{S} m \frac{\epsilon_r - 1}{\rho}, \quad (6)$$

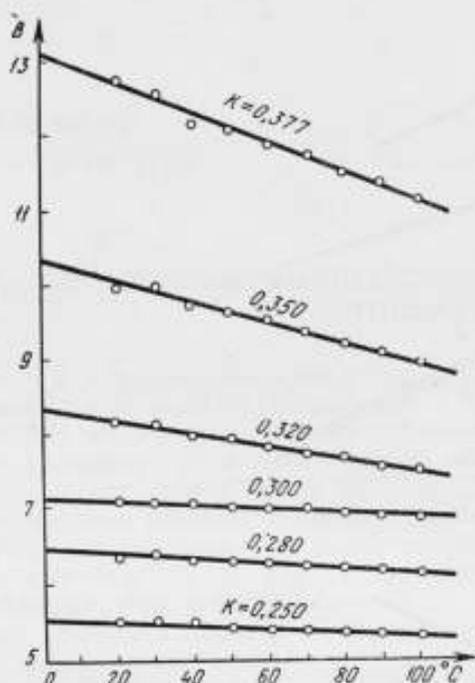


Рис. 3. Зависимость коэффициента B от k .

где m — масса топлива;

S — площадь поперечного сечения бака.

Если измерять емкость такого конденсатора мостовой схемой общего назначения, то показания прибора будут зависеть не только от массы m топлива, но и от его свойств. Однако при измерении датчика емкости специальной измерительной схемой на основе трансформаторного моста с применением дополнительных компенсационных емкостных датчиков показания прибора будут зависеть от массы топлива.

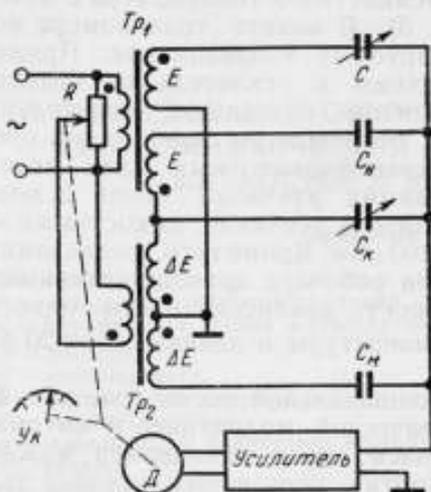


Рис. 4. Электросхема моста.

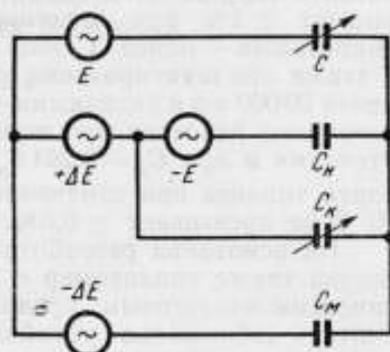


Рис. 5. Принципиальная схема топливомера.

В Киевском институте инженеров гражданской авиации (КИИГА) были разработаны такие измерительные схемы, одна из них приведена на рис. 4. Как видим, она представляет собой многоплечую мостовую схему, плечами которой являются три напряжения E , $-\Delta E$, $-(E - \Delta E)$, рабочий датчик C , компенсационные датчики C_n , C_m , C_k . Датчики C_n и C_m в некоторых случаях могут быть заменены конденсаторами постоянной емкости. Датчик C_k должен быть все время погруженным в контролируемое топливо. Уравнение равновесия такой схемы имеет вид

$$EC - (E - \Delta E)C_n + \Delta EC_k - \Delta EC_m = 0. \quad (7)$$

Если принять $C_n = C_0 \varepsilon_n L$, $C_m = C_0 \varepsilon_r L$ и $\varepsilon_n = 1$, то уравнение упростится и примет вид

$$E \frac{C_0}{S} \frac{\varepsilon_r}{\rho} m + \Delta EC_k - \Delta EC_m = 0. \quad (8)$$

Так как показания прибора определяются напряжением ΔE , то из (8)

$$\Delta E = E \frac{C_0}{S} \frac{\varepsilon_r}{C_m - C_n} m. \quad (9)$$

Ввиду того что $\frac{\epsilon_r}{\rho} = B(1 - k\epsilon_r)$, то, сделав емкость компенсационного датчика равной $kC_m\epsilon_r$, можно получить независимость показаний прибора от электрофизических свойств топлива:

$$\Delta E = E \frac{C_0 B}{SC_m} m. \quad (10)$$

Разработанная принципиальная схема была использована при создании компенсированного электроемкостного топливомера с автоматическим уравниванием (рис. 5). В макете топливомера использованы детали и узлы эксплуатируемых топливомеров. Применение трансформаторной мостовой схемы и усилителя со сравнительно низким входным сопротивлением позволяют значительно снизить погрешность от утечек. Так, погрешность прибора не превышает $\pm 1\%$ при шунтировании трансформаторных плеч моста емкостными — менее 1 *мкф* и активными утечками более 2 *ком*, а также при шунтировании входа усилителя утечками: емкостными — менее 20 000 *пф* и активными — более 100 *ком*. Кроме того, топливомер устойчиво работает при шунтировании рабочего датчика активными утечками и при $C_k = 0,264 C_m$ погрешность измерения массы одного сорта топлива при изменении его температуры в диапазоне от 20 до 70°С не превышает $\pm 0,5\%$.

На основании разработанной принципиальной схемы (см. рис. 4) создан также топливомер с параметрической модуляцией и автоматическим аналоговым уравниванием. Этот топливомер можно считать "абсолютно устойчивым" против паразитных утечек, так как его погрешности не превышают $\pm 1\%$ при шунтировании входа усилителя емкостными менее 10000 *пф* и активными более 3 *ком* утечками, что практически произойти не может. Погрешность этого топливомера лежит в пределах $\pm 1\%$ при снижении тангенса потерь рабочего датчика до 0,4.

В настоящее время в КИИГА разрабатывается топливомер с параметрической модуляцией и уравниванием по двум составляющим полного сопротивления емкостного датчика. Показания такого топливомера будут еще более устойчивы против паразитных утечек, особенно активных, шунтирующих электроды датчика. Этот прибор позволит точно измерять количества топлива с проводящими присадками.

Таким образом, в настоящее время имеется реальная возможность повышения точности измерения весового количества топлива в баках самолетов и увеличения надежности работы топливомеров, что позволит обеспечить безопасность и эффективность полетов самолетов.

А. А. ТУПИЧЕНКОВ, А. В. ФАФУРИН,
В. В. КУЗЬМИН, Ш. Х. АХМЕТЗЯНОВ

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ДЛИН УЧАСТКОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОТОКОВ ЖИДКОСТЕЙ В ЗАКРЫТЫХ КАНАЛАХ

Принятые обозначения

- B — константа,
 C_f — локальный коэффициент трения,
 C_{f0} — коэффициент трения в стандартных условиях,
 D — диаметр,
 H — формпараметр,
 V_* — динамическая скорость,
 W — скорость течения,
 x, y — продольная и поперечная координаты,
 r — радиус,
 p — давление,
 δ — толщина пограничного слоя,
 δ^* — толщина вытеснения,
 δ^{**} — толщина потери импульса,
 μ — коэффициент динамической вязкости,
 ρ — плотность среды,
 τ — касательное напряжение,
 ψ — относительный коэффициент трения,
 ω — безразмерная скорость,
 ξ — безразмерная координата.
- Индексы
 0 — внешняя граница пограничного слоя,
 1 — условия на входе,
 n — граница начального участка.

Правильный учет сопротивления при движении вязкой жидкости в каналах играет важную роль в обеспечении необходимой точности и надежности измерения расхода. Возникающая сила трения определяется природой течения, предьсторией потока, состоянием поверхности, продольным градиентом давления, неизотермичностью и т. п.

Изучение влияния каждого из перечисленных факторов представляет собой самостоятельную и практически нерешенную задачу; проблема существенно усложняется при их совместном воздействии.

Нередко используемые в практике эмпирические методы расчета, основанные на использовании критериальных уравнений, полученных для сравнительно простых граничных условий, становятся неудовлетворительными. Кроме того, совместное влияние многих факторов существенно затрудняет обычную критериальную обработку опытных данных и вносит неопределенность при практическом использовании получаемых формул. Если даже удастся поставить такой эксперимент, в котором в „чистом“ виде определяется влияние на трение

только одного из параметров, то не ясно, сохранится ли это влияние при одновременном действии других параметров. Обилие конфигураций обтекаемых поверхностей также затрудняет практическое применение критериальных уравнений.

В связи со сказанным в практике инженерных расчетов все большее распространение получают аналитические методы расчета, основанные на теории пограничного слоя. В настоящее время разработаны достаточно надежные методы расчета трения в ламинарном пограничном слое для самых разнообразных условий течения [1].

В большинстве практических случаев приходится иметь дело с турбулентным течением жидкости. Несмотря на большое количество теоретических и экспериментальных работ [2,3] в этой области создание рациональной теории турбулентного пограничного слоя остается одной из актуальных задач гидродинамики.

В практике инженерных расчетов широкое распространение получили методы, основанные на полуэмпирических теориях турбулентности. Использование последних предполагает принятие допущений, практическая проверка которых в ряде случаев является невозможной.

В настоящей работе предлагаются методы исследования трения и длины участка гидродинамической стабилизации в трубах постоянного сечения с гладкими и шероховатыми стенками.

1. Трение при течении в канале постоянного сечения

Последовательное применение приближений теории пограничного слоя к уравнениям Навье — Стокса позволяет записать следующую систему уравнений, описывающую течение в канале круглого сечения. Проекция уравнения количества движения на ось x :

$$\rho w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + \rho w_x \frac{\partial w_x}{\partial r} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial r}, \quad (1)$$

на ось r :

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0. \quad (2)$$

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial}{\partial x} (r w_x \rho) + \frac{\partial}{\partial r} (\rho w_x r) = 0. \quad (3)$$

Уравнение (1) с учетом (3) можно записать в виде

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho w_x r) + \frac{\partial}{\partial r} (\rho w_x w_x r) = - r \frac{\partial p}{\partial x} + r \frac{\partial \tau}{\partial r}, \quad (4)$$

тогда

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ - \rho_0 w_0^2 r_0 \left[\frac{\rho w_x}{\rho_0 w_0} \left(1 - \frac{w_x}{w_0} \right) \frac{r}{r_0} \right] + \left[1 - \left(\frac{\rho w_x}{\rho_0 w_0} \right) \right] \frac{r}{r_0} - \frac{r}{r} \right\} + \\ + \frac{\partial}{\partial r} (\rho w_x w_x r) = - r \frac{\partial p}{\partial x} + r \frac{\partial \tau}{\partial r}. \end{aligned} \quad (5)$$

Интегрируя левую и правую части равенства (5) по радиусу в интервале от 0 до r_0 и принимая во внимание, что

$$\int_0^{r_0} \frac{\partial}{\partial r} (\rho w_x w_x r) dr = \rho w_0 \int_0^{r_0} \frac{\partial}{\partial x} (\rho w_x r) dr,$$

получаем:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ -\rho_0 w_0^2 r_0 \left(\delta^{**} + \delta^* - \frac{r_0}{2} \right) \right\} + w_0 \frac{\partial}{\partial x} (\rho_0 w_0 r_0 \delta^*) - w_0 \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_0 w_0 \frac{r_0^2}{2} \right) = -\frac{dp}{dx} \cdot \frac{r_0^2}{2} - r_0 \tau_{cr}, \quad (6)$$

где

$$\delta^* = \int_0^{r_{0\infty}} \left(1 - \frac{\rho w_x}{\rho_0 w_0} \right) \frac{r}{r_0} dr - \text{толщина вытеснения}; \quad (7)$$

$$\delta^{**} = \int_0^{r_{0\infty}} \frac{\rho w_x}{\rho_0 w_0} \left(1 - \frac{w_x}{w_0} \right) \frac{r}{r_0} dr - \text{толщина потери импульса.}$$

Вводя критерии Рейнольдса (R), построенные по диаметру и толщине потери импульса и полагая, что уравнение (2) справедливо для области потенциального течения, т. е.

$$\rho_0 w_0 \frac{dw_0}{dx} = -\frac{dp}{dx}, \quad (8)$$

из (6) имеем

$$\frac{dR^{**}}{dX} + (1+H) \frac{R^{**}}{w_0} \frac{dw_0}{dX} + \frac{R^{**}}{r_0} \frac{dr_0}{dX} R \frac{C_{f0}}{2} \psi. \quad (9)$$

Здесь

$$R^{**} = \frac{\rho_0 w_0 \delta^{**}}{\mu}, \quad X = \frac{x}{D}, \quad H = \frac{\delta^*}{\delta^{**}}, \quad D = 2r_0, \\ R = \frac{\rho_0 w_0 D}{\mu}, \quad \frac{C_f}{2} = \frac{\tau_{cr}}{\rho_0 w_0^2}, \quad \psi = \frac{C_f}{C_{f0}}. \quad (10)$$

Из (9) следует, что статическое давление по длине участка стабилизации будет изменяться по закону

$$\frac{dp}{dX} = \frac{\rho_0 w_0^2}{(1+H) R^{**}} \left\{ \frac{dR^{**}}{dX} + \frac{R^{**}}{r_0} \cdot \frac{dr_0}{dX} - R \frac{C_{f0}}{2} \psi \right\}, \quad (11)$$

а коэффициент трения

$$\frac{C_f}{2} = \frac{1}{R} \left\{ \frac{dR^{**}}{dX} + (1+H) \frac{R^{**}}{w} \cdot \frac{dw_0}{dx} + \frac{R^{**}}{r_0} \cdot \frac{dr}{dX} \right\}. \quad (12)$$

При исследовании гидродинамики потока в каналах постоянного сечения обычно измеряют распределение статического давления. В этом случае (12) удобно записать в виде

$$\frac{C_f}{2} = \frac{1}{R} \left\{ \frac{dR^{**}}{dX} - \frac{(1+H)}{\rho_0 w_0^2} R^{**} \cdot \frac{dp}{dX} \right\}. \quad (13)$$

Таким образом, по известным значениям скорости на оси трубы, градиенту давления и профилю скорости в рассматриваемом сечении можно определить величины, входящие в (13), и тем самым рассчитать коэффициент трения.

Если же воспользоваться уравнением неразрывности в форме

$$\rho_{01} \cdot w_{01} \cdot \pi r_0 = 2\pi \int_0^{r_0} r \cdot \rho w dr \quad (14)$$

и привести его к виду

$$\rho_{01} \cdot \omega_{01} = \rho_0 \omega_0 \left(1 - 2 \frac{\delta^*}{r}\right), \quad (15)$$

то с учетом (10) получаем

$$R^{**} = \frac{R - R_1}{4H}. \quad (16)$$

Подставив (10) в уравнение (12), получаем

$$\frac{C_f}{2} = -\frac{1}{4H} \left\{ \frac{1}{\rho_0 \omega_0^2} \cdot \frac{dp}{dX} \left[1 + \frac{(1+H)(\omega_0 - \omega_{01})}{\omega_0} \right] + \frac{\omega_0 - \omega_{01}}{\omega_0} \cdot \frac{1}{H} \cdot \frac{dH}{dX} \right\}, \quad (17)$$

где ω_{01} — значение скорости в ядре потока на входе в трубу;

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2g(p^* - p_{cr})}{\rho}}. \quad (18)$$

При расчете коэффициента трения по формуле (17) в процессе проведения эксперимента необходимо измерять следующие величины:

- а) полное давление на оси трубы,
- б) статическое давление в данном сечении,
- в) профиль скорости,
- г) параметры на входе в трубу.

При выводе формулы (17) не были использованы какие-либо предпосылки, определяющие тип и характер потока. Поэтому она справедлива для экспериментального установления закона трения как в случае ламинарного течения, так и турбулентного.

Необходимо заметить, что (17) справедлива для случая, когда профиль скорости на входе в канал равномерен по всему сечению, т. е. $R_1^{**} = 0$.

II. Длина начального участка трубы

Под длиной участка гидродинамической стабилизации понимается то расстояние, на котором толщина пограничного слоя становится равной радиусу трубы. Начиная с этого момента, течение характеризуется неизменностью профиля скорости поперек пограничного слоя, постоянством толщины вытеснения, потери импульса, градиента давления и скорости на оси трубы.

Из уравнений (1) и (6) можно получить следующие зависимости для определения скорости на оси канала.

На участке гидродинамической стабилизации:

$$-\frac{dp}{dX} = \rho_0 \omega_0 \frac{d\omega_0}{dX}. \quad (19)$$

На участке стабилизированного течения:

$$-\frac{dp}{dX} = 2 C_f \rho_0 \omega_0. \quad (20)$$

Интегрируя (19) и решая совместно с (20), имеем

$$p^* - p_n = -\frac{1}{4C_f}. \quad (21)$$

Если коэффициент трения определить по (19), то

$$p^* - p_n = -\frac{R^{*m}}{4B} \cdot \frac{dp}{dx}. \quad (22)$$

Здесь p^* — полное давление на входе в опытный участок;

p_n — статическое давление на границе участка стабилизации;

R^* и $\frac{dp}{dx}$ — число Рейнольдса и градиент давления на участке стабилизированного течения.

Из (19) также следует, что

$$p^* - p_n = \left(\frac{\rho_0 w_0^2}{2} \right)_n. \quad (23)$$

Если каким-либо образом связать значение скорости на границе начального участка с параметрами на входе, то можно получить более универсальные зависимости по определению длины начального участка.

Рассмотрим случай ламинарного и турбулентного течений.

А. Ламинарный поток. При установившемся прямолинейном симметричном изотермическом ламинарном течении ускорение потока во времени равно нулю, и уравнение движения в цилиндрических координатах для несжимаемой жидкости можно записать в виде

$$\frac{d}{dr} \left(2\pi r \mu \frac{dw}{dr} \right) = 2\pi r \frac{dp}{dx}. \quad (24)$$

Левая часть этого уравнения представляет собой изменение по радиусу касательных напряжений в симметричном цилиндрическом ламинарном потоке, а правая часть — изменение по радиусу силы давления, действующей на столб жидкости объемом $\pi r^2 \cdot 1$.

Интегрируя уравнение (24) и решая его относительно w с учетом граничных условий для симметричного профиля, получаем [3]:

$$w = -\frac{1}{4\mu} \cdot \frac{dp}{dx} (r_0^2 - r^2). \quad (25)$$

Формула (25) выражает характерное для ламинарного течения параболическое распределение скоростей по сечению трубы.

При равномерном распределении скоростей на входе в опытный участок скорость на оси трубы на границе начального участка связана со скоростью на входе следующим соотношением:

$$w_{01} = \frac{1}{\pi r_0^2} \int_0^{r_0} 2\pi r w dr = -\frac{r_0^2}{8\mu} \cdot \frac{dp}{dx}. \quad (26)$$

Подставляя значение $\frac{dp}{dx}$ из (26) в (25), получаем:

$$w_{0n} = 2 \cdot w_{01}. \quad (27)$$

Тогда из (23) следует:

$$p^* - p_n = 2\rho_0 \cdot w_{01}^2. \quad (28)$$

На рис. 1 показано изменение статического давления в начальном участке трубы в функции расхода и геометрического размера трубы.

Как видим, имеет место значительный рост статического давления от расхода при одном и том же диаметре трубы.

Таким образом, при ламинарном течении жидкости можно использовать два метода определения длины участка гидродинамической стабилизации.

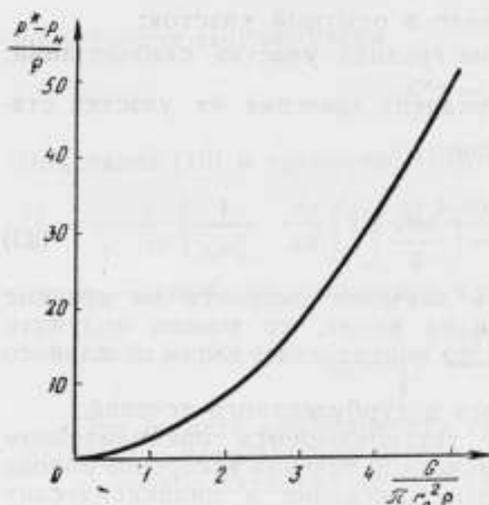


Рис. 1. Изменение статического давления на границе начального участка в функции расхода и радиуса трубы.

По второму способу также необходимо знание закона изменения статического давления по длине трубы. Значение статического давления в начальном участке трубы определяется по формуле (28). Его величина наносится на кривую $p_{ст} = f(x)$, и определяется соответствующая продольная координата.

Б. Турбулентный поток. Для случая турбулентного течения жидкости пока отсутствуют зависимости, связывающие среднюю скорость потока с ее максимальным значением. Поэтому для определения давления в сечении, соответствующем длине начального участка, рассчитаем значение скорости на оси.

На границе начального участка число Рейнольдса, построенное по толщине потери импульса, связано со скоростью и толщиной потери импульса соотношением

$$R_n^{**} = R \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta^{**}}{r_0} = R_1 \frac{w_{0n}}{2} \cdot \frac{\delta^{**}}{r_0}, \quad (29)$$

с другой стороны

$$R_n^{**} = \frac{R_1 (w_{0n} - 1)}{4H}. \quad (30)$$

Из уравнений (29) и (30) получаем

$$w_{0n} = \frac{1}{1 - 2H \frac{\delta^{**}}{r_0}}, \quad (31)$$

здесь $w_{0n} = \frac{w_{0n}}{w_{01}}$ — относительная скорость на границе начального участка;

Первый по закону изменения статического давления. В этом методе необходимо знать распределение статического давления по длине трубы, то-есть

$$p_{ст} = f(x).$$

Методом наименьших квадратов необходимо построить зависимость

$$p_{ст} = a_p \cdot x^2 + b_p \cdot x + C_p.$$

Найти градиент давления

$$\frac{dp_{ст}}{dx} = 2a_p \cdot x + b_p$$

и то сечение, где его изменение находится в пределах 1%, принять за границу начального участка.

w_{01} и R_1 — скорость и число Рейнольдса на входе в опытный участок;

H — формпараметр.

Подставляя (31) в (23), получаем

$$p^* - p_n = \frac{\frac{\rho_0 w_{01}^2}{2}}{\left(1 - 2H \frac{\delta^{**}}{r_0}\right)^2} \quad (32)$$

При аппроксимации профиля скорости степенной зависимостью вида $w = \xi n$ необходимо учитывать, что показатель является функцией числа Рейнольдса. По данным Никурадзе, эта величина для турбулентных потоков меняется от 1/6 до 1/10 при соответствующем росте числа Рейнольдса.

На рис. 2 представлены результаты расчета статического давления в начальном участке трубы в функции показателя степени n .

Как видим, его изменение значительно влияет на величину статического давления в начальном участке трубы. При этом толщина вытеснения, потери импульсов и формпараметр H вычислялись по формулам:

$$\frac{\delta^*}{r_0} = \frac{(n+2)(n+1) + 2(n+1) - 2(n+2)}{2(n+2)(n+1)} \quad (33)$$

$$\frac{\delta^{**}}{r_0} = \frac{3(n+2)(2n+1) - 2(n+1)(2n+1) - 2(n+1)(n+2)}{2(n+1)(n+2)(2n+1)} \quad (34)$$

$$H = \frac{\delta^*}{\delta^{**}} = 2(n+1) \frac{(n+2)(n+1) + 2(n+1) - 2(n+2)}{3(n+2)(2n+1) - 2(n+1)(2n+1) - 2(n+1)(n+2)} \quad (35)$$

полученных путем интегрирования уравнений (7).

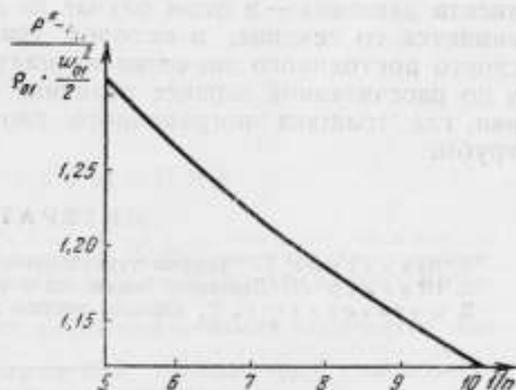


Рис. 2. Зависимость приведенного статического давления от показателя степени n .

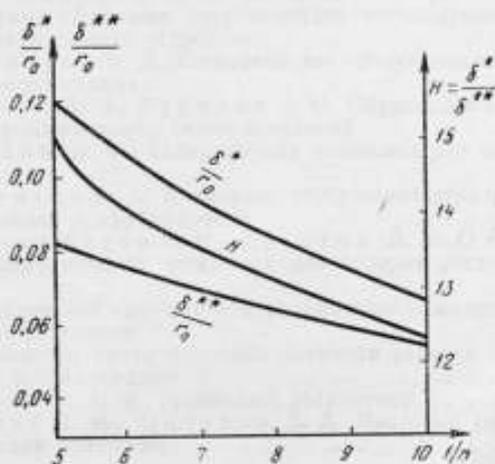


Рис. 3. Влияние показателя степени в законе профиля скорости на интегральные характеристики.

На рис. 3 приведены результаты расчета по формулам (33) — (35) для различных значений показателя степени n .

В случае турбулентных течений можно предложить также два способа определения длины начального участка: по изменению градиента давления — в этом случае за длину начального участка принимается то сечение, в котором градиент давления отличается от своего постоянного значения на малую вперед заданную величину и по рассчитанной заранее величине статического давления в сечении, где толщина пограничного слоя становится равной радиусу трубы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шлихтинг Г. Теория турбулентности. М., ИЛ, 1955.
2. Шиллер Л. Движение жидкости в трубах. ОНТИ НКТП, 1936.
3. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. М., Машгиз, 1962.



СО Д Е Р Ж А Н И Е

	Стр.
Введение	3
Хусанов Н. М., Тупиченков А. А. Принципы организации службы точных измерений расходов, количеств и вместимостей жидкостей и газов	5
Кремлевский П. П. Задачи метрологии в области измерения расхода жидкостей и газов	13
Иващенко В. В., Федоров В. А. Создание средств для исследований и испытаний датчиков расхода на различные среды	18
Кивиллис С. С. Оценка погрешности автоматического измерения и контроля расхода жидкости при помощи дифманометров-расходомеров	23
Кос. Ю. Ю. Массовые расходомеры сыпучих и пульповидных материалов и оборудование для их поверки	28
Зарецкий Л. И. Основные направления в развитии средств измерения расхода гидросмеси и твердого при напорном гидротранспорте	35
Хусанов Н. М., Филатов Б. И., Хусанов Б. Г. Состояние измерительной техники в нефтедобывающей, газовой, нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслях промышленности	42
Гладковский Ю. Н. К вопросу расчета и пересчета статической характеристики турбинного расходомера	47
Тупиченков А. А., Меньшиков Б. Н., Валенцукевич Е. И. Некоторые вопросы гидродинамики трубопоршневых расходомерных установок	51
Бродин И. С., Лесишин В. М., Праскова З. М. Шаропоршневая газомерная установка	57
Якин П. В., Зазерский В. Д. Образцовая расходомерная установка с закрытой гидравлической системой для специальных жидкостей	60
Гужов А. М., Медведев В. Ф. Измерение расхода газожидкостных смесей	65
Абдурашитов С. А., Тупиченков А. А., Хандзель В. И., Сотников П. С. Некоторые вопросы теории движения сниженных газов в трубопроводах	70
Абдурашитов С. А., Мануков Э. С. Методика геометрического конструирования низкомоментных объемных гидромоторов, используемых в качестве датчиков расходоизмерительных устройств	81
Шишкин З. А., Никифоров В. Д. Установка для градуировки микрорасходомеров жидкости и ее аттестация	89
Бродин И. С., Феденчук Д. И., Курлиев А. И. Образцовая газомерная установка с фотоэлектронным повторением показаний	95
Квочкин В. Ф., Кланцов В. Ф. Тарировочная установка для измерения малых расходов газа	102
Юшков Л. Н., Тупиченков А. А. К вопросу учета количества нефти и нефтепродуктов, находящихся в трубопроводе	106
Тупиченков А. А., Меньшиков Б. Н., Бусыгин Л. Н. О возможности использования трубопоршневых установок для поверки расходомеров	111
Заря Ю. И. Пневмо-механический способ стабилизации напора жидкости для образцовых расходомерных установок	115
Мясников Н. С. Особенности проектирования датчиков расхода с телом обтекания для измерения вязких жидкостей	119
Мельник В. С., Борисова А. Ф. Турбинный расходомер	126
Катыс Г. П., Ильинский В. М., Овчаров В. А. Массовые расходомеры с приторможенным телом вращения	129

	Стр.
Денисов Ю. Т., Овчаров В. А. Массовые расходомеры топлива	134
Ягушев Р. М., Никитин Е. В. О возможности построения магнитного расходомера для сред с ионной проводимостью и возбуждением постоянным магнитом	138
Бражников Н. И., Вавилов О. С., Оганесов А. С. Ультразвуковой двухканальный частотно-импульсный метод бесконтактного контроля скорости потока жидкости	141
Корепанов В. Д., Терентьев А. Т. Измерение скорости потока жидкостей импульсным методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР)	146
Бражников Н. И. Метод градуировки фазовых ультразвуковых расходомеров без натурной проливки	150
Лобов Б. И. Электроимпульсный преобразователь числа оборотов счетчика	154
Бражников Н. И., Полянский А. А. Компенсация концентрационных погрешностей двухканальных фазовых ультразвуковых расходомеров	158
Бражников Н. И., Полянский А. А. Ультразвуковой фазовый контроль скорости потока жидкости или газа	162
Дюдин Б. В., Кипнис И. А., Колмаков В. А. Измерение расхода жидкостей с помощью ультразвука в трубопроводах малого диаметра	166
Бражников Н. И., Каневский И. Н. Импульсный ультразвуковой метод исследования и контроля малых потоков жидкостей	172
Лейтман М. Б., Барьюдин Э. Л. Прецизионные вторичные устройства измерения мгновенного расхода с унифицированным токовым выходом	178
Лейтман М. Б. Транзисторные счетно-решающие устройства для извлечения квадратного корня с токовым выходом к расходомерам	184
Лобов Б. И., Меньшиков Б. Н., Бусыгин Л. Н. Устройство для отсчета калиброванного объема в трубопоршневых установках	189
Грохольский А. Л., Иванов И. А. О построении компенсированных электроемкостных топливомеров	194
Тупиченков А. А., Фафурин А. В., Кузьмин В. В., Ахметзянов Ш. Х. Об исследовании сопротивления и длин участков гидродинамической стабилизации потоков жидкостей в закрытых каналах	199

РЕФЕРАТЫ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ
В СБОРНИКЕ

УДК 681.121

Принципы организации службы точных измерений расходов,
количеств и вместимостей жидкостей и газов

Хусаинов Н. М., Туличенков А. А.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 5

Авторами приводятся конкретные предложения по совершенствованию службы надзора за работой измерителей расхода, количества и вместимостей веществ, охватывающие организационную и научно-техническую сторону вопроса. Делается вывод о необходимости создания национального метрологического центра, оснащенного соответствующей научно-экспериментальной базой, способной обеспечить планомерные разработки научного, технического и методологического характера. Табл. 2, илл. 2.

УДК 681.121

Задачи метрологии в области измерения расхода жидкостей и газов

Кремлевский П. П.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 13

В статье рассматриваются две группы задач: первая — поддержание единства измерений и обеспечение поверки приборов; вторая — совершенствование существующих методов измерений и наряду с этим разработка новых. Автор показывает, что необходимы координированные усилия ряда ведомств и организаций и прежде всего научных учреждений Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР для успешного решения этих задач.

УДК 681.121

Создание средств для исследований и испытаний датчиков расхода
на различные среды

Ивашиненко В. В., Федоров В. А.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 18

Авторами статьи проведены исследования по созданию расходомерных установок на различные среды. При создании расходомерных стендов, кроме снятия основных метрологических характеристик, учитывалась также возможность испытания датчиков расхода на надежность. Даны описания принципиальных схем расходомерных установок на среды: керосин, масло, каменноугольную смолу и сыпучие материалы. Илл. 3. Библ. 6 назв.

121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200

THE STATE OF TEXAS,
COUNTY OF [Name]
I, [Name], County Clerk, do hereby certify that the within and foregoing is a true and correct copy of the original as the same appears on file in my office.

WITNESSED my hand and the seal of said County at [Location], this [Date] day of [Month], 19[Year].

[Signature]

County Clerk

Оценка погрешностей автоматического измерения и контроля расхода жидкостей при помощи дифманометров-расходомеров

Кивилис С. С.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 23

Автором дан анализ источников погрешностей при измерениях расхода указанным методом. Обзор систем нормирования погрешностей измерения расхода дифманометрами, принятыми в национальных стандартах разных стран и в Рекомендациях ИСО. Предложения по дальнейшему развитию раздела «Погрешности измерения расхода». Библ. 12 назв.

УДК 681.121 : 531.751.3

Массовые расходомеры сыпучих и пульповидных материалов и оборудование для их поверки

Кос Ю. Ю.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 28

В основу расходомеров и стендового оборудования для сыпучих и пульповидных материалов положен принцип измерения массового расхода по крутящему моменту, создаваемому движущимся в свободном потоке веществом, на валу лопастного чувствительного элемента, вращающегося с постоянной скоростью. Характеристика контрольной установки: предел измерений — 100 т/ч, класс точности — 0,5, основная рабочая среда — вода, контрольные среды — пульпы с влажностью не ниже 35%. Илл. 3. Библ. 8 назв.

УДК 681.121 : 531.751.3

Основные направления в развитии средств измерения расхода гидросмеси и твердого при напорном гидротранспорте

Зарецкий Л. И.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 35

В статье предлагается метод, основанный на трех приборах: расходомере, плотномере и консистомере. При этом определение массового расхода твердого не зависит от изменения его плотности. Метод является общим для всех гидросмесей, однако в некоторых случаях можно исключить либо плотномер, либо консистомер. Выбор комплекса приборов может быть осуществлен на базе графиков по известной погрешности отдельных приборов и заданной погрешности измерения твердого с учетом плотности твердого и его колебания. Илл. 3. Библ. 3 назв.

THE NEW YORK

УДК 681.121

**Состояние измерительной техники в нефтедобывающей, газовой,
нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслях
промышленности**

Хусаинов Н. М., Филатов В. И., Хусаинов Б. Г.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 42

Авторами проведен анализ состояния измерительной техники на предприятиях указанных отраслей по оснащенности, уровню, надежности и номенклатуре применяемых контрольно-измерительных приборов по организации службы КИПиА и метрологической. На основе анализа разработаны рекомендации по совершенствованию и созданию более точных приборов и поверочных средств, которыми необходимо оснастить предприятия. Илл. 1. Табл. 1.

УДК 681.121.4

**К вопросу расчета и пересчета статической характеристики
турбинного расходомера**

Гладковский Ю. Н.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 47

В статье предлагается приближенный метод расчета угловой скорости турбины в разгонном режиме, с учетом влияния геометрии проточной части расходомера и Re потока. Полученные закономерности были использованы при разработке и обосновании метода пересчета тарировочной характеристики турбинного расходомера с осевой винтовой турбиной с воды (или другой тарировочной жидкости) на измеряемую среду с другой вязкостью и плотностью. Илл. 1. Библ. 4 назв.

УДК 681.121

**Некоторые вопросы гидродинамики трубопоршневых
расходомерных установок**

Тупиченков А. А., Меньшиков Б. Н., Валенцукевич Е. Н.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 51

В статье рассматриваются некоторые вопросы гидродинамики процессов, возникающих в ТПУ при движении поршня. Исследованы начальный, конечный и рабочий участки движения. Решение дифференциального уравнения движения позволяет определить длину начального и конечного участков, а также места расположения детекторов-переключателей. Кроме того, получена формула для подсчета скорости поршня, что позволяет определить размеры ТПУ. Илл. 2. Библ. 5 назв.

THE UNIVERSITY OF CHICAGO
DEPARTMENT OF CHEMISTRY

REPORT OF THE COMMISSIONERS OF THE BOARD OF REGENTS

FOR THE YEAR ENDING JUNE 30, 1919

CHICAGO, ILLINOIS
PUBLISHED BY THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS
1919

1919

THE UNIVERSITY OF CHICAGO
DEPARTMENT OF CHEMISTRY

REPORT OF THE COMMISSIONERS OF THE BOARD OF REGENTS

FOR THE YEAR ENDING JUNE 30, 1919

CHICAGO, ILLINOIS
PUBLISHED BY THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS
1919

1919

THE UNIVERSITY OF CHICAGO
DEPARTMENT OF CHEMISTRY

REPORT OF THE COMMISSIONERS OF THE BOARD OF REGENTS

FOR THE YEAR ENDING JUNE 30, 1919

CHICAGO, ILLINOIS
PUBLISHED BY THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS
1919

УДК 681.121

Шаропоршневая газомерная установка

Бродин И. С., Лесишин В. М., Праскова З. М.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 57

Авторами разработана и изготовлена шаропоршневая установка для точного измерения расхода и количества. Особое внимание уделялось способу ввода в поток газа и выводу из него шарового поршня без нарушения установившегося режима работы поверяемого прибора. Для съема показаний поверяемого прибора разработан фотоэлектронный повторитель с механическим и электронным счетчиками. Илл. 2. Библ. 4 назв.

УДК 681.121

Образцовая расходомерная установка с закрытой гидравлической системой для специальных жидкостей

Якин П. В., Зазерский В. Д.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 60

В данной статье описывается образцовая расходомерная установка, разработанная авторами, для доводки и аттестации лабораторных, стендовых и бортовых датчиков массового расхода топлива и других жидкостей, требующих замкнутой гидросистемы. В целях максимальной стабилизации расхода жидкости в установке применены специальные устройства для демпфирования колебаний расхода. Илл. 2. Библ. 10 назв.

УДК 681.121

Измерение расхода газожидкостных смесей

Гужов А. И., Медведев В. Ф.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 65

Авторами исследовалось истечение газожидкостных смесей через цилиндрические насадки с целью установления возможности их использования для измерения расходов. Экспериментально установлено, что для каждого газосодержания имеется своя вполне определенная зависимость скорости истечения от перепада давлений, причем с увеличением перепада величина скорости растет, достигая при критическом отношении давлений величины критической скорости для данного газосодержания. Обработка опытных данных позволила установить обобщенную зависимость скорости истечения от перепада давления, на основании которой предложена методика расчета расхода смеси в докритическом режиме истечения. Илл. 5. Библ. 3 назв.

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

УДК 681.121

**Некоторые вопросы теории движения сжиженных газов
в трубопроводах**

*Абдурашитов С. А., Тупиченков А. А., Хандзель В. И.,
Сотников П. С.*

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 70

В статье рассмотрены вопросы гидротермодинамики сжиженных газов с фазовыми превращениями. По результатам изучения становится возможным установить место расположения расходомерных устройств как на жидкостном, так и на газовом участке трубопровода с гарантией от появления второй фазы. Илл. 7. Библ. 3 назв.

УДК 681.121

**Методика геометрического конструирования низкомоментных
объемных гидромоторов, используемых в качестве датчиков
расходоизмерительных устройств**

Абдурашитов С. А., Мануков Э. С.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 81

Авторами излагается физическая суть работы гидромотора в системе трубопровода. Формулируется задача оптимизации геометрической конструкции, которая сводится к достижению динамической устойчивости движения потока в системе трубопровод-гидромотор путем плавного перехода от круглого трубопровода к гидравлически наиболее выгодным размерам сечения прямоугольного профиля каналов обтекания в камере гидромотора. Приводятся примеры геометрического конструирования гидромоторов, рабочим органом которых являются два взаимообкатываемых колеса с овальной центроиды и ротор с прямыми выдвигающимися лопастями. Илл. 4. Библ. 8 назв.

УДК 681.121.4

**Установка для градуировки микрорасходомеров жидкости
и ее аттестация**

Шижкин Э. А., Никифоров В. Д.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 89

В статье описана разработанная и аттестованная установка для градуировки микрорасходомеров жидкости. Установка имеет три диапазона измерений: $2,5 \cdot 10^{-6} \div 2,5 \cdot 10^{-5}$ кг/сек; $2,5 \cdot 10^{-5} \div 2,5 \cdot 10^{-4}$ кг/сек; $2,5 \cdot 10^{-4} \div 2,5 \cdot 10^{-3}$ кг/сек. Среднеквадратическая погрешность не превышает 0,16%. Илл. 3. Библ. 6 назв.

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

PHILOSOPHY DEPARTMENT

PHILOSOPHY 101

LECTURE NOTES

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

PHILOSOPHY DEPARTMENT

PHILOSOPHY 101

LECTURE NOTES

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

PHILOSOPHY DEPARTMENT

PHILOSOPHY 101

LECTURE NOTES

УДК 681.121

Образцовая газомерная установка с фотоэлектронным повторением показаний

Бродин И. С., Феденчук Д. И., Курилин А. И.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 95

В статье описана установка с мерником, разработанная с использованием результатов исследования близкой по принципу действия газомерной установки, созданной ранее. Колокольный мерник — усовершенствованной конструкции. Используется вновь разработанная фотоэлектронная аппаратура для повторения показаний поверяемого прибора. Температурный режим установки и помещения контролируется специальными приборами повышенной точности. Илл. 6. Библ. 4 назв.

УДК 681.121

Тарировочная установка для измерения малых расходов газа

Квочкин В. Ф., Клапцов В. Ф.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 102

Авторами разработана и смонтирована установка для газовых расходомеров на потоке от 0,5 до 30 м³/ч. Установка позволяет тарировать негостированные дроссельные органы и ротаметры. В результате тарировки диафрагм на указанные расходы удалось свести материальный баланс пилотной установки по расходу углекислого газа с точностью до 0,8%. Илл. 1.

УДК 681.121

К вопросу учета количества нефти и нефтепродуктов, находящихся в трубопроводе

Юшков Л. Н., Тупиченков А. А.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 106

В зависимости от изменения плотности изменяется количество продукта, находящегося в трубопроводе до и после перекачки через него нефтегруза. Для учета этой величины авторами предлагается использовать номографический метод и указывается способ построения номограммы, которая позволяет определить абсолютную величину различия и учесть ее при определении отпущенного количества нефтегруза. Илл. 3. Табл. 1. Библ. 4 назв.

УДК 681.121

О возможности использования трубопоршневых установок для поверки расходомеров

Тупиченков А. А., Меньшиков Б. Н., Бусыгин Л. Н.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 111

Авторами рассматриваются вопросы работы ТПУ в качестве поверочного средства расходомеров. Анализируется работа начального и конечного участков расходомерной системы и приводятся предложения по обеспечению постоянства движения. Илл. 2. Библ. 4 назв.

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

188

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

188

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

188

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

УДК 681.121

**Пневмо-механический способ стабилизации напора жидкости
для образцовых расходомерных установок**

Заря Ю. И.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 115

Для стабилизации потока принято использовать дорогие и громоздкие напорные башни. Автором предлагается компактный пневмо-механический стабилизатор напора жидкости, который может быть применен во вновь сооружаемых расходомерных установках. Илл. 2. Библ. 3 назв.

УДК 681.121

**Особенности проектирования датчиков расхода с телом обтекания
для измерения вязких жидкостей**

Мясников Н. С.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 119

Изучение вопроса показало, что наиболее достоверные результаты могут быть получены с телом обтекания, выполненным в виде концентрических колец, соединенных между собой перемычками, с наружным радиусом, равным среднему арифметическому значению ламинарного и турбулентного течений средних значений поля скоростей. Измерительным упругим элементом датчика является торсионная трубка. Илл. 4. Библ. 3 назв.

УДК 681.121.4

Турбинный расходомер

Мельник В. С., Борисова А. Ф.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 126

В статье предлагается устройство, позволяющее учесть изменение угловой скорости ротора турбинного расходомера при изменении характера потока, путем установки за основной крыльчаткой второй, свободно посаженной на той же оси винтовой крыльчатки, на таком расстоянии от первой, при котором возмущения потока от первой осредняются по всему сечению, причем шаг винтовых лопастей второй крыльчатки больше шага винтовых лопастей первой. Илл. 1.

УДК 681.121.4 : 531.751.3

Массовые расходомеры с приторможенным телом вращения

Катыс Г. П., Ильинский В. М., Овчаров В. А.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 129

Авторами разработан метод, изготовлен и испытан массовый расходомер с гистерезисной муфтой, применяемой для торможения предварительного закрученного потока. Расходомер может применяться в гидравлических и газовых магистралях, где поток по каким-то иным (а не с целью измерения) причинам имеет достаточную угловую скорость относительно оси трубопровода. Вариантом устройства является специальное создание закрутки в потоке, причем не предъявляется никаких требований к стационарной стабильности угловой скорости закрутки. Илл. 4. Библ. 2 назв.

THE UNIVERSITY OF CHICAGO
DEPARTMENT OF CHEMISTRY

REPORT

BY [Name], [Title]

The following report was prepared for the purpose of [purpose] and is based on the work done during the period [dates].

RESULTS

The results of the experiments are summarized in the following table:

[Table header]

[Table content]

The above results show that [conclusion] and are in agreement with the theoretical predictions.

DISCUSSION

[Text]

[Text]

[Text]

The results of the present work are in agreement with those of [reference] and [reference].

REFERENCES

[Reference 1]

[Reference 2]

[Reference 3]

The author wishes to express his appreciation to [Name] for his assistance during the course of this work.

Массовые расходомеры топлива

Денисов Ю. Т., Овчаров В. А.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 134

В статье представлено описание турборасходомеров на номинальные потоки 200 и 450 кг/сек, состоящие из датчиков массового расхода, электронной измерительной схемы, автоматически определяющей массовый расход по промежутку времени, и дешифратора расходомерных данных или шлейфового осциллографа. Точность измерения расхода $\pm 1\%$. Илл. 2. Табл. 1. Библ. 1 назв.

УДК 681.121.082.74

О возможности построения расходомера для сред с ионной проводимостью и возбуждением постоянным магнитом

Ягушев Р. М., Никитин Е. В.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 138

Авторами проведены предварительные электрохимические исследования для изучения вопросов стабильности электродных потенциалов, поляризации электродов и поведения цепи электрод-жидкость-электрод при малых токах. Полученные результаты дают основание рассчитывать на возможность разработки магнитного расходомера повышенной точности с постоянным магнитом, который может найти применение для градуировки электромагнитных расходомеров в лабораторных условиях. Илл. 2. Библ. 5 назв.

УДК 681.121.082.4

Ультразвуковой двухканальный частотно-импульсный метод бесконтактного контроля скорости потока жидкости

Бражников Н. И., Вавилов О. С., Оганесов А. С.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 141

В статье рассматривается двухканальный частотно-импульсный ультразвуковой метод контроля скорости потока жидких сред с применением измерительного преобразования без нарушения сечения трубопровода и изменения направления потока жидкости. Анализируется зависимость разностной частоты расходомера от параметров измерительного преобразователя и параметров контролируемой среды при выполнении контроля с двумя преломляющими поверхностями и жидкостными внешними волноводами. Илл. 1. Библ. 8 назв.

УДК 681.121 : 539.16

Измерение скорости потока жидкостей импульсным методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР)

Корепанов В. Д., Теректеев А. Т.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 146

В статье предлагается способ измерения расхода жидких образцов в трубопроводах малого диаметра, основанный на ЯМР. Пределы измеряемых расходов составили 0,01—0,1 л/сек, минимальная ошибка измерений за счет градуировки — 0,2—0,3%. Общая погрешность макета прибора составила от 0,24 до 1,7%. Илл. 2. Библ. 4 назв.

THE SOUTH STAR

Published weekly by the

South Star Publishing Company, 100 N. 1st St., St. Louis, Mo.

Subscription price, \$1.00 per annum in advance. Single copies, 10 cents. Entered as second-class matter, July 16, 1879, under post office number 100, St. Louis, Mo. Post office at St. Louis, Mo., authorized to sell at special rate of postage provided for in section 1103, Act of October 3, 1917. Accepted for mailing at special rate of postage provided for in section 1103, Act of October 3, 1917, on July 1, 1920.

Copyright, 1920, by

South Star Publishing Company, 100 N. 1st St., St. Louis, Mo.

Printed at the

South Star Publishing Company, 100 N. 1st St., St. Louis, Mo.

The South Star Publishing Company is a corporation organized under the laws of the State of Missouri. Its capital stock is \$100,000, divided into 10,000 shares of \$10.00 each. The company is owned and controlled by its stockholders. Its principal office is at 100 N. 1st St., St. Louis, Mo. It is engaged in the publication of the South Star, a weekly newspaper, and in the sale of advertising space therein. It also publishes and sells various other publications and merchandise.

Published by

South Star Publishing Company, 100 N. 1st St., St. Louis, Mo.

South Star Publishing Company, 100 N. 1st St., St. Louis, Mo.

South Star Publishing Company, 100 N. 1st St., St. Louis, Mo.

The South Star Publishing Company is a corporation organized under the laws of the State of Missouri. Its capital stock is \$100,000, divided into 10,000 shares of \$10.00 each. The company is owned and controlled by its stockholders. Its principal office is at 100 N. 1st St., St. Louis, Mo. It is engaged in the publication of the South Star, a weekly newspaper, and in the sale of advertising space therein. It also publishes and sells various other publications and merchandise.

Published by

South Star Publishing Company, 100 N. 1st St., St. Louis, Mo.

South Star Publishing Company, 100 N. 1st St., St. Louis, Mo.

South Star Publishing Company, 100 N. 1st St., St. Louis, Mo.

The South Star Publishing Company is a corporation organized under the laws of the State of Missouri. Its capital stock is \$100,000, divided into 10,000 shares of \$10.00 each. The company is owned and controlled by its stockholders. Its principal office is at 100 N. 1st St., St. Louis, Mo. It is engaged in the publication of the South Star, a weekly newspaper, and in the sale of advertising space therein. It also publishes and sells various other publications and merchandise.

УДК 681.121.082.4

**Метод градуировки фазовых ультразвуковых расходомеров
без натурной проливки**

Бражников Н. И.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 150

Автором рассматриваются характерные особенности распространения волны в движущейся жидкости при вводе высокочастотных ультразвуковых колебаний бесконтактным способом, исключающим возникновение локальных гидродинамических возмущений. Отмечается практическая возможность расчетной градуировки ультразвуковых расходомеров по существующим теоретическим соотношениям и обосновывается необходимость ввода поправочного акустико-гидродинамического коэффициента. Илл. 1. Библ. 5 назв.

УДК 531.775

Электронимпульсный преобразователь числа оборотов счетчика

Лобов Б. И.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 154

В статье описан электронимпульсный преобразователь числа оборотов счетчика, обеспечивающий повышение чувствительности и точности поверяемого прибора путем исключения механических связей между выходным валом ротора счетчика и входным валом импульсного датчика и замены механической ускоряющей передачи электрической. Илл. 1. Библ. 5 назв.

УДК 681.121.082.4

**Компенсация концентрационных погрешностей двухканальных
фазовых ультразвуковых расходомеров**

Бражников Н. И., Полянский А. А.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 158

Авторами предлагается новый способ, обеспечивающий компенсацию концентрационных погрешностей двухканальных фазовых ультразвуковых расходомеров как при необходимости нарушения целостности стенок трубопровода, так и без нее. Илл. 1. Библ. 2 назв.

УДК 681.121.082.4

**Ультразвуковой фазовый контроль скорости потока жидкости
или газа**

Бражников Н. И., Полянский А. А.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 162

Предлагаемый метод позволяет вести эффективный контроль скорости потока жидкости или газа с компенсацией температурных погрешностей практически независимо от их величины и знака. Библ. 2 назв.

OF THE

REIGN

OF

THE

УДК 681.121.082

**Измерение расхода жидкостей с помощью ультразвука
в трубопроводах малого диаметра**

Дюдим Б. В., Кипнис И. А., Колмаков В. А.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 166

Блок-схема прибора включает генератор, измерительный датчик, два приемно-усилительных канала с умножителями частоты, фазовый детектор и индикатор. Конструкция датчика позволяет контролировать агрессивные жидкости при больших давлениях. Кроме среднего расхода измеряются также пульсации расхода. Влияние изменения температуры и давления производится по номограммам. Илл. 8. Библи. 7 назв.

УДК 681.121.082.4

Импульсный ультразвуковой метод исследования и контроля малых потоков жидкостей

Браженков Н. И., Каневский И. Н.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 172

Авторами рассматриваются различные источники погрешностей, обусловленных реверберационными явлениями и нестабильностью фронтов ультразвуковых импульсов. Даются рекомендации по выбору и расчету основных параметров импульсного ультразвукового расходомера. Илл. 3. Библи. 4 назв.

УДК 531.787.083

Прецизионные вторичные устройства измерения мгновенного расхода с унифицированным токовым выходом

Лейтман М. Б., Барюдин Э. Л.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 178

В статье анализируются устройства для измерения расходов с выходной частотой первичных преобразователей выше и ниже 5 гц. Устройства первой группы представляют собой преобразователи частоты в постоянное напряжение. Вторая группа устройств предназначена для работы с низкочастотными первичными преобразователями расхода. Илл. 4. Библи. 4 назв.

Journal of the American Medical Association
Published Weekly, except on Sundays, Holidays, and Days of the Week when the Office is Closed

Volume 14, No. 1, January 1, 1917

Published by the American Medical Association, 535 North Dearborn Street, Chicago, Ill.

Subscription prices: Single copies, 10 cents; 12 issues, \$1.00; 24 issues, \$1.95; 36 issues, \$2.85; 48 issues, \$3.75; 60 issues, \$4.65; 72 issues, \$5.55; 84 issues, \$6.45; 96 issues, \$7.35; 108 issues, \$8.25; 120 issues, \$9.15; 132 issues, \$10.05; 144 issues, \$10.95; 156 issues, \$11.85; 168 issues, \$12.75; 180 issues, \$13.65; 192 issues, \$14.55; 204 issues, \$15.45; 216 issues, \$16.35; 228 issues, \$17.25; 240 issues, \$18.15; 252 issues, \$19.05; 264 issues, \$19.95; 276 issues, \$20.85; 288 issues, \$21.75; 300 issues, \$22.65; 312 issues, \$23.55; 324 issues, \$24.45; 336 issues, \$25.35; 348 issues, \$26.25; 360 issues, \$27.15; 372 issues, \$28.05; 384 issues, \$28.95; 396 issues, \$29.85; 408 issues, \$30.75; 420 issues, \$31.65; 432 issues, \$32.55; 444 issues, \$33.45; 456 issues, \$34.35; 468 issues, \$35.25; 480 issues, \$36.15; 492 issues, \$37.05; 504 issues, \$37.95; 516 issues, \$38.85; 528 issues, \$39.75; 540 issues, \$40.65; 552 issues, \$41.55; 564 issues, \$42.45; 576 issues, \$43.35; 588 issues, \$44.25; 600 issues, \$45.15; 612 issues, \$46.05; 624 issues, \$46.95; 636 issues, \$47.85; 648 issues, \$48.75; 660 issues, \$49.65; 672 issues, \$50.55; 684 issues, \$51.45; 696 issues, \$52.35; 708 issues, \$53.25; 720 issues, \$54.15; 732 issues, \$55.05; 744 issues, \$55.95; 756 issues, \$56.85; 768 issues, \$57.75; 780 issues, \$58.65; 792 issues, \$59.55; 804 issues, \$60.45; 816 issues, \$61.35; 828 issues, \$62.25; 840 issues, \$63.15; 852 issues, \$64.05; 864 issues, \$64.95; 876 issues, \$65.85; 888 issues, \$66.75; 900 issues, \$67.65; 912 issues, \$68.55; 924 issues, \$69.45; 936 issues, \$70.35; 948 issues, \$71.25; 960 issues, \$72.15; 972 issues, \$73.05; 984 issues, \$73.95; 996 issues, \$74.85; 1008 issues, \$75.75; 1020 issues, \$76.65; 1032 issues, \$77.55; 1044 issues, \$78.45; 1056 issues, \$79.35; 1068 issues, \$80.25; 1080 issues, \$81.15; 1092 issues, \$82.05; 1104 issues, \$82.95; 1116 issues, \$83.85; 1128 issues, \$84.75; 1140 issues, \$85.65; 1152 issues, \$86.55; 1164 issues, \$87.45; 1176 issues, \$88.35; 1188 issues, \$89.25; 1200 issues, \$90.15; 1212 issues, \$91.05; 1224 issues, \$91.95; 1236 issues, \$92.85; 1248 issues, \$93.75; 1260 issues, \$94.65; 1272 issues, \$95.55; 1284 issues, \$96.45; 1296 issues, \$97.35; 1308 issues, \$98.25; 1320 issues, \$99.15; 1332 issues, \$100.05; 1344 issues, \$100.95; 1356 issues, \$101.85; 1368 issues, \$102.75; 1380 issues, \$103.65; 1392 issues, \$104.55; 1404 issues, \$105.45; 1416 issues, \$106.35; 1428 issues, \$107.25; 1440 issues, \$108.15; 1452 issues, \$109.05; 1464 issues, \$109.95; 1476 issues, \$110.85; 1488 issues, \$111.75; 1500 issues, \$112.65; 1512 issues, \$113.55; 1524 issues, \$114.45; 1536 issues, \$115.35; 1548 issues, \$116.25; 1560 issues, \$117.15; 1572 issues, \$118.05; 1584 issues, \$118.95; 1596 issues, \$119.85; 1608 issues, \$120.75; 1620 issues, \$121.65; 1632 issues, \$122.55; 1644 issues, \$123.45; 1656 issues, \$124.35; 1668 issues, \$125.25; 1680 issues, \$126.15; 1692 issues, \$127.05; 1704 issues, \$127.95; 1716 issues, \$128.85; 1728 issues, \$129.75; 1740 issues, \$130.65; 1752 issues, \$131.55; 1764 issues, \$132.45; 1776 issues, \$133.35; 1788 issues, \$134.25; 1800 issues, \$135.15; 1812 issues, \$136.05; 1824 issues, \$136.95; 1836 issues, \$137.85; 1848 issues, \$138.75; 1860 issues, \$139.65; 1872 issues, \$140.55; 1884 issues, \$141.45; 1896 issues, \$142.35; 1908 issues, \$143.25; 1920 issues, \$144.15; 1932 issues, \$145.05; 1944 issues, \$145.95; 1956 issues, \$146.85; 1968 issues, \$147.75; 1980 issues, \$148.65; 1992 issues, \$149.55; 2004 issues, \$150.45; 2016 issues, \$151.35; 2028 issues, \$152.25; 2040 issues, \$153.15; 2052 issues, \$154.05; 2064 issues, \$154.95; 2076 issues, \$155.85; 2088 issues, \$156.75; 2100 issues, \$157.65; 2112 issues, \$158.55; 2124 issues, \$159.45; 2136 issues, \$160.35; 2148 issues, \$161.25; 2160 issues, \$162.15; 2172 issues, \$163.05; 2184 issues, \$163.95; 2196 issues, \$164.85; 2208 issues, \$165.75; 2220 issues, \$166.65; 2232 issues, \$167.55; 2244 issues, \$168.45; 2256 issues, \$169.35; 2268 issues, \$170.25; 2280 issues, \$171.15; 2292 issues, \$172.05; 2304 issues, \$172.95; 2316 issues, \$173.85; 2328 issues, \$174.75; 2340 issues, \$175.65; 2352 issues, \$176.55; 2364 issues, \$177.45; 2376 issues, \$178.35; 2388 issues, \$179.25; 2400 issues, \$180.15; 2412 issues, \$181.05; 2424 issues, \$181.95; 2436 issues, \$182.85; 2448 issues, \$183.75; 2460 issues, \$184.65; 2472 issues, \$185.55; 2484 issues, \$186.45; 2496 issues, \$187.35; 2508 issues, \$188.25; 2520 issues, \$189.15; 2532 issues, \$190.05; 2544 issues, \$190.95; 2556 issues, \$191.85; 2568 issues, \$192.75; 2580 issues, \$193.65; 2592 issues, \$194.55; 2604 issues, \$195.45; 2616 issues, \$196.35; 2628 issues, \$197.25; 2640 issues, \$198.15; 2652 issues, \$199.05; 2664 issues, \$199.95; 2676 issues, \$200.85; 2688 issues, \$201.75; 2700 issues, \$202.65; 2712 issues, \$203.55; 2724 issues, \$204.45; 2736 issues, \$205.35; 2748 issues, \$206.25; 2760 issues, \$207.15; 2772 issues, \$208.05; 2784 issues, \$208.95; 2796 issues, \$209.85; 2808 issues, \$210.75; 2820 issues, \$211.65; 2832 issues, \$212.55; 2844 issues, \$213.45; 2856 issues, \$214.35; 2868 issues, \$215.25; 2880 issues, \$216.15; 2892 issues, \$217.05; 2904 issues, \$217.95; 2916 issues, \$218.85; 2928 issues, \$219.75; 2940 issues, \$220.65; 2952 issues, \$221.55; 2964 issues, \$222.45; 2976 issues, \$223.35; 2988 issues, \$224.25; 3000 issues, \$225.15; 3012 issues, \$226.05; 3024 issues, \$226.95; 3036 issues, \$227.85; 3048 issues, \$228.75; 3060 issues, \$229.65; 3072 issues, \$230.55; 3084 issues, \$231.45; 3096 issues, \$232.35; 3108 issues, \$233.25; 3120 issues, \$234.15; 3132 issues, \$235.05; 3144 issues, \$235.95; 3156 issues, \$236.85; 3168 issues, \$237.75; 3180 issues, \$238.65; 3192 issues, \$239.55; 3204 issues, \$240.45; 3216 issues, \$241.35; 3228 issues, \$242.25; 3240 issues, \$243.15; 3252 issues, \$244.05; 3264 issues, \$244.95; 3276 issues, \$245.85; 3288 issues, \$246.75; 3300 issues, \$247.65; 3312 issues, \$248.55; 3324 issues, \$249.45; 3336 issues, \$250.35; 3348 issues, \$251.25; 3360 issues, \$252.15; 3372 issues, \$253.05; 3384 issues, \$253.95; 3396 issues, \$254.85; 3408 issues, \$255.75; 3420 issues, \$256.65; 3432 issues, \$257.55; 3444 issues, \$258.45; 3456 issues, \$259.35; 3468 issues, \$260.25; 3480 issues, \$261.15; 3492 issues, \$262.05; 3504 issues, \$262.95; 3516 issues, \$263.85; 3528 issues, \$264.75; 3540 issues, \$265.65; 3552 issues, \$266.55; 3564 issues, \$267.45; 3576 issues, \$268.35; 3588 issues, \$269.25; 3600 issues, \$270.15; 3612 issues, \$271.05; 3624 issues, \$271.95; 3636 issues, \$272.85; 3648 issues, \$273.75; 3660 issues, \$274.65; 3672 issues, \$275.55; 3684 issues, \$276.45; 3696 issues, \$277.35; 3708 issues, \$278.25; 3720 issues, \$279.15; 3732 issues, \$280.05; 3744 issues, \$280.95; 3756 issues, \$281.85; 3768 issues, \$282.75; 3780 issues, \$283.65; 3792 issues, \$284.55; 3804 issues, \$285.45; 3816 issues, \$286.35; 3828 issues, \$287.25; 3840 issues, \$288.15; 3852 issues, \$289.05; 3864 issues, \$289.95; 3876 issues, \$290.85; 3888 issues, \$291.75; 3900 issues, \$292.65; 3912 issues, \$293.55; 3924 issues, \$294.45; 3936 issues, \$295.35; 3948 issues, \$296.25; 3960 issues, \$297.15; 3972 issues, \$298.05; 3984 issues, \$298.95; 3996 issues, \$299.85; 4008 issues, \$300.75; 4020 issues, \$301.65; 4032 issues, \$302.55; 4044 issues, \$303.45; 4056 issues, \$304.35; 4068 issues, \$305.25; 4080 issues, \$306.15; 4092 issues, \$307.05; 4104 issues, \$307.95; 4116 issues, \$308.85; 4128 issues, \$309.75; 4140 issues, \$310.65; 4152 issues, \$311.55; 4164 issues, \$312.45; 4176 issues, \$313.35; 4188 issues, \$314.25; 4200 issues, \$315.15; 4212 issues, \$316.05; 4224 issues, \$316.95; 4236 issues, \$317.85; 4248 issues, \$318.75; 4260 issues, \$319.65; 4272 issues, \$320.55; 4284 issues, \$321.45; 4296 issues, \$322.35; 4308 issues, \$323.25; 4320 issues, \$324.15; 4332 issues, \$325.05; 4344 issues, \$325.95; 4356 issues, \$326.85; 4368 issues, \$327.75; 4380 issues, \$328.65; 4392 issues, \$329.55; 4404 issues, \$330.45; 4416 issues, \$331.35; 4428 issues, \$332.25; 4440 issues, \$333.15; 4452 issues, \$334.05; 4464 issues, \$334.95; 4476 issues, \$335.85; 4488 issues, \$336.75; 4500 issues, \$337.65; 4512 issues, \$338.55; 4524 issues, \$339.45; 4536 issues, \$340.35; 4548 issues, \$341.25; 4560 issues, \$342.15; 4572 issues, \$343.05; 4584 issues, \$343.95; 4596 issues, \$344.85; 4608 issues, \$345.75; 4620 issues, \$346.65; 4632 issues, \$347.55; 4644 issues, \$348.45; 4656 issues, \$349.35; 4668 issues, \$350.25; 4680 issues, \$351.15; 4692 issues, \$352.05; 4704 issues, \$352.95; 4716 issues, \$353.85; 4728 issues, \$354.75; 4740 issues, \$355.65; 4752 issues, \$356.55; 4764 issues, \$357.45; 4776 issues, \$358.35; 4788 issues, \$359.25; 4800 issues, \$360.15; 4812 issues, \$361.05; 4824 issues, \$361.95; 4836 issues, \$362.85; 4848 issues, \$363.75; 4860 issues, \$364.65; 4872 issues, \$365.55; 4884 issues, \$366.45; 4896 issues, \$367.35; 4908 issues, \$368.25; 4920 issues, \$369.15; 4932 issues, \$370.05; 4944 issues, \$370.95; 4956 issues, \$371.85; 4968 issues, \$372.75; 4980 issues, \$373.65; 4992 issues, \$374.55; 5004 issues, \$375.45; 5016 issues, \$376.35; 5028 issues, \$377.25; 5040 issues, \$378.15; 5052 issues, \$379.05; 5064 issues, \$379.95; 5076 issues, \$380.85; 5088 issues, \$381.75; 5100 issues, \$382.65; 5112 issues, \$383.55; 5124 issues, \$384.45; 5136 issues, \$385.35; 5148 issues, \$386.25; 5160 issues, \$387.15; 5172 issues, \$388.05; 5184 issues, \$388.95; 5196 issues, \$389.85; 5208 issues, \$390.75; 5220 issues, \$391.65; 5232 issues, \$392.55; 5244 issues, \$393.45; 5256 issues, \$394.35; 5268 issues, \$395.25; 5280 issues, \$396.15; 5292 issues, \$397.05; 5304 issues, \$397.95; 5316 issues, \$398.85; 5328 issues, \$399.75; 5340 issues, \$400.65; 5352 issues, \$401.55; 5364 issues, \$402.45; 5376 issues, \$403.35; 5388 issues, \$404.25; 5400 issues, \$405.15; 5412 issues, \$406.05; 5424 issues, \$406.95; 5436 issues, \$407.85; 5448 issues, \$408.75; 5460 issues, \$409.65; 5472 issues, \$410.55; 5484 issues, \$411.45; 5496 issues, \$412.35; 5508 issues, \$413.25; 5520 issues, \$414.15; 5532 issues, \$415.05; 5544 issues, \$415.95; 5556 issues, \$416.85; 5568 issues, \$417.75; 5580 issues, \$418.65; 5592 issues, \$419.55; 5604 issues, \$420.45; 5616 issues, \$421.35; 5628 issues, \$422.25; 5640 issues, \$423.15; 5652 issues, \$424.05; 5664 issues, \$424.95; 5676 issues, \$425.85; 5688 issues, \$426.75; 5700 issues, \$427.65; 5712 issues, \$428.55; 5724 issues, \$429.45; 5736 issues, \$430.35; 5748 issues, \$431.25; 5760 issues, \$432.15; 5772 issues, \$433.05; 5784 issues, \$433.95; 5796 issues, \$434.85; 5808 issues, \$435.75; 5820 issues, \$436.65; 5832 issues, \$437.55; 5844 issues, \$438.45; 5856 issues, \$439.35; 5868 issues, \$440.25; 5880 issues, \$441.15; 5892 issues, \$442.05; 5904 issues, \$442.95; 5916 issues, \$443.85; 5928 issues, \$444.75; 5940 issues, \$445.65; 5952 issues, \$446.55; 5964 issues, \$447.45; 5976 issues, \$448.35; 5988 issues, \$449.25; 6000 issues, \$450.15; 6012 issues, \$451.05; 6024 issues, \$451.95; 6036 issues, \$452.85; 6048 issues, \$453.75; 6060 issues, \$454.65; 6072 issues, \$455.55; 6084 issues, \$456.45; 6096 issues, \$457.35; 6108 issues, \$458.25; 6120 issues, \$459.15; 6132 issues, \$460.05; 6144 issues, \$460.95; 6156 issues, \$461.85; 6168 issues, \$462.75; 6180 issues, \$463.65; 6192 issues, \$464.55; 6204 issues, \$465.45; 6216 issues, \$466.35; 6228 issues, \$467.25; 6240 issues, \$468.15; 6252 issues, \$469.05; 6264 issues, \$469.95; 6276 issues, \$470.85; 6288 issues, \$471.75; 6300 issues, \$472.65; 6312 issues, \$473.55; 6324 issues, \$474.45; 6336 issues, \$475.35; 6348 issues, \$476.25; 6360 issues, \$477.15; 6372 issues, \$478.05; 6384 issues, \$478.95; 6396 issues, \$479.85; 6408 issues, \$480.75; 6420 issues, \$481.65; 6432 issues, \$482.55; 6444 issues, \$483.45; 6456 issues, \$484.35; 6468 issues, \$485.25; 6480 issues, \$486.15; 6492 issues, \$487.05; 6504 issues, \$487.95; 6516 issues, \$488.85; 6528 issues, \$489.75; 6540 issues, \$490.65; 6552 issues, \$491.55; 6564 issues, \$492.45; 6576 issues, \$493.35; 6588 issues, \$494.25; 6600 issues, \$495.15; 6612 issues, \$496.05; 6624 issues, \$496.95; 6636 issues, \$497.85; 6648 issues, \$498.75; 6660 issues, \$499.65; 6672 issues, \$500.55; 6684 issues, \$501.45; 6696 issues, \$502.35; 6708 issues, \$503.25; 6720 issues, \$504.15; 6732 issues, \$505.05; 6744 issues, \$505.95; 6756 issues, \$506.85; 6768 issues, \$507.75; 6780 issues, \$508.65; 6792 issues, \$509.55; 6804 issues, \$510.45; 6816 issues, \$511.35; 6828 issues, \$512.25; 6840 issues, \$513.15; 6852 issues, \$514.05; 6864 issues, \$514.95; 6876 issues, \$515.85; 6888 issues, \$516.75; 6900 issues, \$517.65; 6912 issues, \$518.55; 6924 issues, \$519.45; 6936 issues, \$520.35; 6948 issues, \$521.25; 6960 issues, \$522.15; 6972 issues, \$523.05; 6984 issues, \$523.95; 6996 issues, \$524.85; 7008 issues, \$525.75; 7020 issues, \$526.65; 7032 issues, \$527.55; 7044 issues, \$528.45; 7056 issues, \$529.35; 7068 issues, \$530.25; 7080 issues, \$531.15; 7092 issues, \$532.05; 7104 issues, \$532.95; 7116 issues, \$533.85; 7128 issues, \$534.75; 7140 issues, \$535.65; 7152 issues, \$536.55; 7164 issues, \$537.45; 7176 issues, \$538.35; 7188 issues, \$539.25; 7200 issues, \$540.15; 7212 issues, \$541.05; 7224 issues, \$541.95; 7236 issues, \$542.85; 7248 issues, \$543.75; 7260 issues, \$544.65; 7272 issues, \$545.55; 7284 issues, \$546.45; 7296 issues, \$547.35; 7308 issues, \$548.25; 7320 issues, \$549.15; 7332 issues, \$550.05; 7344 issues, \$550.95; 7356 issues, \$551.85; 7368 issues, \$552.75; 7380 issues, \$553.65; 7392 issues, \$554.55; 7404 issues, \$555.45; 7416 issues, \$556.35; 7428 issues, \$557.25; 7440 issues, \$558.15; 7452 issues, \$559.05; 7464 issues, \$559.95; 7476 issues, \$560.85; 7488 issues, \$561.75; 7500 issues, \$562.65; 7512 issues, \$563.55; 7524 issues, \$564.45; 7536 issues, \$565.35; 7548 issues, \$566.25; 7560 issues, \$567.15; 7572 issues, \$568.05; 7584 issues, \$568.95; 7596 issues, \$569.85; 7608 issues, \$570.75; 7620 issues, \$571.65; 7632 issues, \$572.55; 7644 issues, \$573.45; 7656 issues, \$574.35; 7668 issues, \$575.25; 7680 issues, \$576.15; 7692 issues, \$577.05; 7704 issues, \$577.95; 7716 issues, \$578.85; 7728 issues, \$579.75; 7740 issues, \$580.65; 7752 issues, \$581.55; 7764 issues, \$582.45; 7776 issues, \$583.35; 7788 issues, \$584.25; 7800 issues, \$585.15; 7812 issues, \$586.05; 7824 issues, \$586.95; 7836 issues, \$587.85; 7848 issues, \$588.75; 7860 issues, \$589.65; 7872 issues, \$590.55; 7884 issues, \$591.45; 7896 issues, \$592.35; 7908 issues, \$593.25; 7920 issues, \$594.15; 7932 issues, \$595.05; 7944 issues, \$595.95; 7956 issues, \$596.85; 7968 issues, \$597.75; 7980 issues, \$598.65; 7992 issues, \$599.55; 8004 issues, \$600.45; 8016 issues, \$601.35; 8028 issues, \$602.25; 8040 issues, \$603.15; 8052 issues, \$604.05; 8064 issues, \$604.95; 8076 issues, \$605.85; 8088 issues, \$606.75; 8100 issues, \$607.65; 8112 issues, \$608.55; 8124 issues, \$609.45; 8136 issues, \$610.35; 8148 issues, \$611.25; 8160 issues, \$612.15; 8172 issues, \$613.05; 8184 issues, \$613.95; 8196 issues, \$614.85; 8208 issues, \$615.75; 8220 issues, \$616.65; 8232 issues, \$617.55; 8244 issues, \$618.45; 8256 issues, \$619.35; 8268 issues, \$620.25; 8280 issues, \$621.15; 8292 issues, \$622.05; 8304 issues, \$622.95; 8316 issues, \$623.85; 8328 issues, \$624.75; 8340 issues, \$625.65; 8352 issues, \$626.55; 8364 issues, \$627.45; 8376 issues, \$628.35; 8388 issues, \$629.25; 8400 issues, \$630.15; 8412 issues, \$631.05; 8424 issues, \$631.95; 8436 issues, \$632.85; 8448 issues, \$633.75; 8460 issues, \$634.65; 8472 issues, \$635.55; 8484 issues, \$636.45; 8496 issues, \$637.35; 8508 issues, \$638.25; 8520 issues, \$639.15; 8532 issues, \$640.05; 8544 issues, \$640.95; 8556 issues, \$641.85; 8568 issues, \$642.75; 8580 issues, \$643.65; 8592 issues, \$644.55; 8604 issues, \$645.45; 8616 issues, \$646.35; 8628 issues, \$647.25; 8640 issues, \$648.15; 8652 issues, \$649.05; 8664 issues, \$649.95; 8676 issues, \$650.85; 8688 issues, \$651.75; 8700 issues, \$652.65; 8712 issues, \$653.55; 8724 issues, \$654.45; 8736 issues, \$655.35; 8748 issues, \$656.25; 8760 issues, \$657.15; 8772 issues, \$658.05; 8784 issues, \$658.95; 8796 issues, \$659.85; 8808 issues, \$660.75; 8820 issues, \$661.65; 8832 issues, \$662.55; 8844 issues, \$663.45; 8856 issues, \$664.35; 8868 issues, \$665.25; 8880 issues, \$666.15; 8892 issues, \$667.05; 8904 issues, \$667.95; 8916 issues, \$668.85; 8928 issues, \$669.75; 8940 issues, \$670.65; 8952 issues, \$671.55; 8964 issues, \$672.45; 8976 issues, \$673.35; 8988 issues, \$674.25; 9000 issues, \$675.15; 9012 issues, \$676.05; 9024 issues, \$676.95; 9036 issues, \$677.85; 9048 issues, \$678.75; 9060 issues, \$679.65; 9072 issues, \$680.55; 9084 issues, \$681.45; 9096 issues, \$682.35; 9108 issues, \$683.25; 9120 issues, \$684.15; 9132 issues, \$685.05; 9144 issues, \$685.95; 9156 issues, \$686.85; 9168 issues, \$687.75; 9180 issues, \$688.65; 9192 issues, \$689.55; 9204 issues, \$690.45; 9216 issues, \$691.35; 9228 issues, \$692.25; 9240 issues, \$693.15; 9252 issues, \$694.05; 9264 issues, \$694.95; 9276 issues, \$695.85; 9288 issues, \$696.75; 9300 issues, \$697.65; 9312 issues, \$698.55; 9324 issues, \$699.45; 9336 issues, \$700.35; 9348 issues, \$701.25; 9360 issues, \$702.15; 9372 issues, \$703.05; 9384 issues, \$703.95; 9396 issues, \$704.85; 9408 issues, \$705.75; 9420 issues, \$706.65; 9432 issues, \$707.55; 9444 issues, \$708.45; 9456 issues, \$709.35; 9468 issues, \$710.25; 9480 issues, \$711.15; 9492 issues, \$712.05; 9504 issues, \$712.95; 9516 issues, \$713.85; 9528 issues, \$714.75; 9540 issues, \$715.65; 9552 issues, \$716.55; 9564 issues, \$717.45; 9576 issues, \$718.35; 9588 issues, \$719.25; 9600 issues, \$720.15; 9612 issues, \$721.05; 9624 issues, \$721.95; 9636 issues, \$722.85; 9648 issues, \$723.75; 9660 issues, \$724.65; 9672 issues, \$725.55; 9684 issues, \$726.45; 9696 issues, \$727.35; 9708 issues, \$728.25; 9720 issues, \$729.15; 9732 issues, \$730.05; 9744 issues, \$730.95; 9756 issues, \$731.85; 9768 issues, \$732.75; 9780 issues, \$733.65; 9792 issues, \$734.55; 9804 issues, \$735.45; 9816 issues, \$736.35; 9828 issues, \$737.25; 9840 issues, \$738.15; 9852 issues, \$739.05; 9864 issues, \$739.95; 9876 issues, \$740.85;

УДК 531.787.083.6

Транзисторные счетно-решающие устройства для извлечения квадратного корня с токовым выходом к расходомерам

Лейтман М. Б.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 184

В статье предложены два транзисторных счетно-решающих устройства для извлечения квадратного корня из величины постоянного напряжения, отличающиеся высокой термостабильностью и имеющие значительный динамический диапазон преобразований. Илл. 4. Библ. 3 назв.

УДК 681.121

Устройство для отсчета калиброванного объема в трубопоршневых установках

Лобов Б. И., Меньшиков Б. Н., Бусыгин Л. Н.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 189

Авторами разработано устройство для отсчета калиброванного объема с дифференциальной схемой управления магнитным потоком постоянных магнитов, взаимодействующих с установленными в качестве исполнительных элементов язычковыми реле. Илл. 2. Табл. 2. Библ. 7 назв.

УДК 681.128

О построении компенсированных электроемкостных топливомеров

Грохольский А. Л., Иванов И. А.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 194

Авторами обнаружено, что погрешности измерения веса топлива в баках самолетов могут быть уменьшены при использовании составных емкостных датчиков и специальных схем измерения, учитывающих взаимную связь физических и электрических свойств топлива. Точность может быть повышена также разработкой прибора с параметрической модуляцией и уравниванием по двум составляющим полного сопротивления емкостного датчика. Илл. 5.

Received of the Treasurer of the
Board of Directors of the
City of New York
the sum of \$1000.00
for the purchase of
land for the
City of New York
at the rate of \$1000.00
per acre

1871

Received of the Treasurer of the
Board of Directors of the
City of New York
the sum of \$1000.00
for the purchase of
land for the
City of New York
at the rate of \$1000.00
per acre

1872

Received of the Treasurer of the
Board of Directors of the
City of New York
the sum of \$1000.00
for the purchase of
land for the
City of New York
at the rate of \$1000.00
per acre

УДК 681.121.2

Об исследовании сопротивления и длин участков гидродинамической стабилизации потоков жидкостей в закрытых каналах

Тупиченков А. А., Фафурин А. В., Кузьмин В. В., Ахмедзянов Ш. Х.

Труды Всесоюзного совещания, Казань, 1969, стр. 199

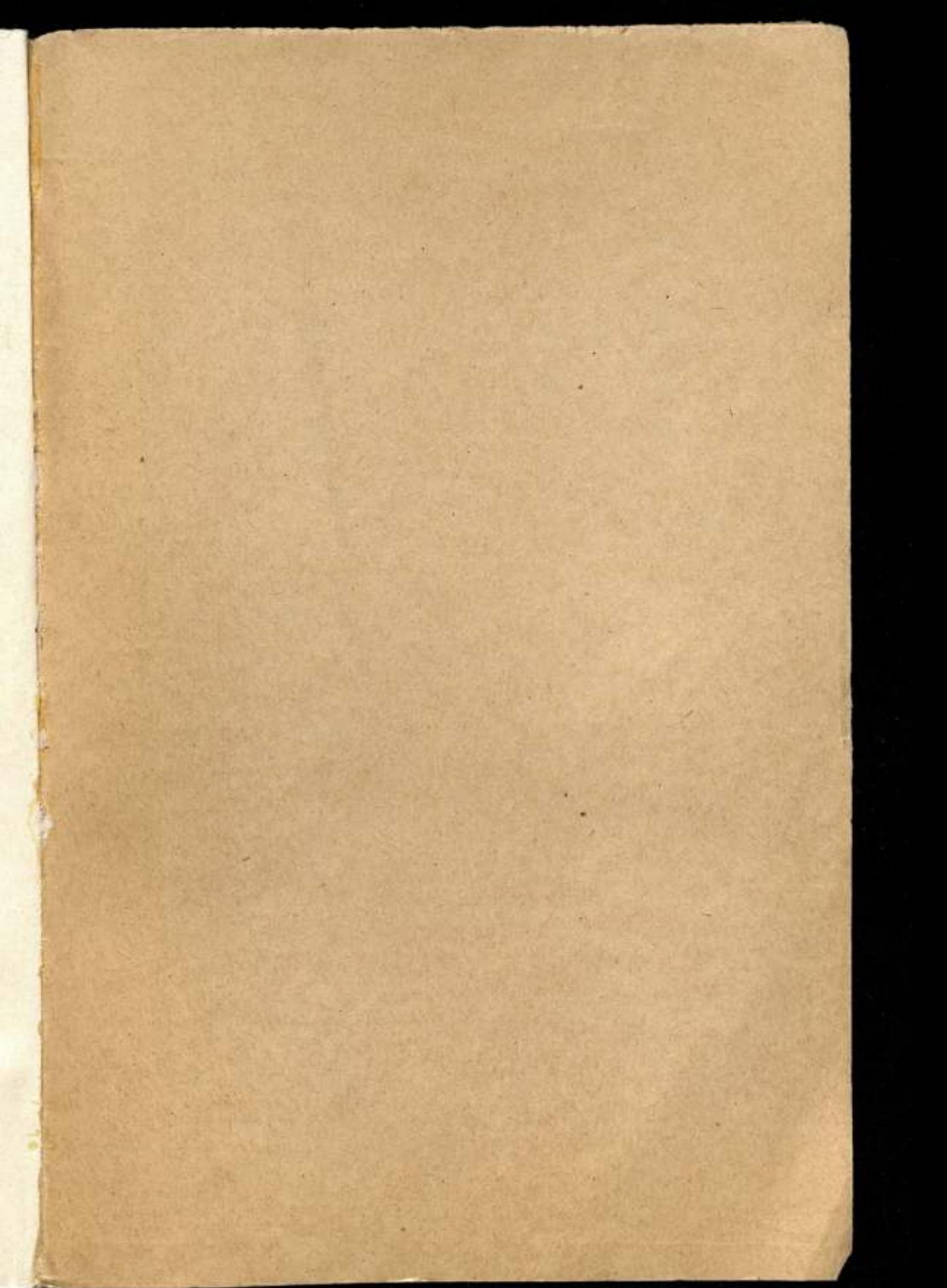
В статье предлагаются методы исследования трения и длины участка гидродинамической стабилизации в трубах постоянного сечения с гладкими и шероховатыми поверхностями стенок. При выводе формулы сопротивления в данном исследовании не делалось каких-либо предпосылок, определяющих тип и характер потока, поэтому метод применим для экспериментального установления закона трения для ламинарных и турбулентных потоков. Илл. 3. Библ. 3 назв.

ТОЧНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДОВ И КОЛИЧЕСТВ ВЕЩЕСТВ

Выпуск 122 (182)

Редактор *М. Х. Воздвиженская*
Технический редактор *С. Ф. Проворовская*
Корректор *Л. И. Уракова*

Т-01889. Слоно в набор 15/VIII 1969 г. Подл. к печ. 27/II 1970 г.
Формат 70×108^{1/2}. Бум. типографская № 1, 14,5 п. л.
14,81 уч. изд. л. Тираж 2000. Заказ А-373. Цена 1 р. 48 к.
Издательство стандартов, Москва, К-1, ул. Щусева, 4
Казань, типография „Татполиграф“, ул. Миславского, д. 9.



Цена 1 руб. 48 коп.