

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»
(НГТУ)**

**Образовательно-научный институт ядерной энергетики и технической физики
им. академика Ф.М. Митенкова**

Выпускающая кафедра «Ядерные реакторы и энергетические установки»



УТВЕРЖДАЮ:

Директор института
Хробостов А.Е.
«01» июня 2020 г.

**Методические рекомендации по дисциплине
«Специальные методы измерения и контроля»
ОП ВО**

по направлению: 14.04.02 Ядерная физика и технологии

Направленность (программы): Ядерные реакторы и энергетические установки

Квалификация выпускника: магистр

Очная форма обучения

г. Нижний Новгород
2020 г

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы по дисциплине «Специальные методы измерения и контроля» предназначены для магистров второго курса, обучающихся по направлению 14.04.02 «Ядерная физика и технологии».

Цель методических рекомендаций: помочь студентам при самостоятельном изучении учебной программы с использованием лекционных материалов и рекомендуемой учебно-методической литературы.

Самостоятельная работа направлена на развитие профессиональной компетенции дисциплины ПК-6.

Разделы изучаемой дисциплины перечислены в таблице 1.

Таблица 1 – Самостоятельная работа студентов

| № раздела | Наименование разделов | Содержание темы (перечисление дидактических единиц – на усмотрение составителя РУП) | Трудоемкость (час.) |
|-----------|---|--|---------------------|
| 1 | Научно-исследовательская работа | Тема 1.1. Применение математических моделей в научных исследованиях. | 1,5 |
| | | Тема 1.2. Научные исследования. | 1,5 |
| 2 | Научная информация. | Тема 2. Поиск, накопление и обработка научной информации | 3 |
| 3 | Научные исследования. | Тема 3.1. Теоретические исследования | 0,5 |
| | | Тема 3.2. Моделирование в научных исследованиях | 0,5 |
| | | Тема 3.3. Экспериментальные исследования | 1 |
| 4 | Применение вычислительной техники в научных исследованиях. | Тема 4.1. Вычислительные системы. | 1 |
| | | Тема 4.2. Работа с экспериментальными данными. | 1 |
| 5 | Обработка результатов экспериментальных исследований. | Тема 5.1. Обработка ошибок. | 1 |
| | | Тема 5.2. Работа с экспериментальными данными. | 1 |
| 6 | Планирование эксперимента | Тема 6. Основы теории планирования эксперимента. | 2 |
| 7 | Представление результатов эксперимента. | Тема 7. Оформление результатов. | 2 |
| 8 | Измерения | Тема 8.1. Измерение температур. | 1 |
| | | Тема 8.2. Измерение давления. | 0,5 |
| | | Тема 8.3. Параметры жидкостей, газа, пара и тепла. | 0,5 |
| 9 | Тепломеры. | Тема 9. Тепломеры. | 2 |
| 10 | Измерения в теплотехнике | Тема 10.1. Измерение уровня жидкостей. | 1 |
| | | Тема 10.2. Измерение уровня воды. | 1 |
| 11 | Анализ и контроль | Тема 11.1. Контроль за качеством. | 1 |
| | | Тема 11.2. Анализ состава жидкостей. | 1 |
| 12 | Измерительные преобразователи | Тема 12. Измерительные преобразователи в теплотехнике. | 2 |

| | | | |
|----|-------------------------------|--|-----------|
| 13 | Анализаторы | Тема 13. Типы анализаторов. | 2 |
| 14 | Системы в теплотехнике | Тема 14.1. Информационно-измерительные системы. | 0,5 |
| | | Тема 14.2. Системы теплотехнического контроля. | 1 |
| | | Тема 14.3. Теплотехнические исследования. | 0,5 |
| | ИТОГО | | 30 |

1. Виды и формы самостоятельной работы студентов по дисциплине «Специальные методы измерения и контроля»:

- систематическая проработка лекций, учебной и специальной технической литературы;
- подготовка к экзамену.

2. Методические рекомендации для студентов по конкретным видам самостоятельной работы

- 1) Систематическая проработка лекций, учебной и специальной технической литературы.
- 2) Подготовка к экзамену. Методические рекомендации:
 1. Внимательно прочитайте материал лекций.
 2. Постарайтесь разобраться с непонятными, в частности, новыми терминами, используя рекомендованную литературу.
 3. Ответьте на контрольные вопросы для самопроверки, имеющиеся в данных методических указаниях.

Показатели оценки результатов внеаудиторной самостоятельной работы:

- качество уровня освоения учебного материала;
- умение использовать теоретические знания при ответах на вопросы;
- обоснованность и четкость изложения ответа.

3. Перечень рекомендуемой литературы

| № п/п | Автор(ы) | Заглавие | Издательство, год издания | Назначение, вид издания, гриф | Кол-во экз. в библиотеке |
|----------------------------------|----------------|--------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Основная литература | | | | | |
| 1 | Медведева Р.В. | Средства измерений | М.: Кнорус, 2011 | Учебник | 1 |
| Дополнительная литература | | | | | |
| 1 | Назаров В.И. | Теплотехнические измерения и приборы | Минск: Техноперспектива, 208 | Учебное пособие | 2 |

Перечень контрольных вопросов по дисциплине "Специальные методы измерения и контроля"

1. Общие сведения об измерении расхода жидкостей и газов.
2. Общие сведения об измерении температур. Температурные шкалы.
3. Особенности теплотехнического контроля на ЯЭУ.
4. Общие сведения об измерениях уровня жидкостей.
5. Измерение расхода жидкостей и газов по перепаду давления в сужающем устройстве.
6. Термометры, основанные на расширении и изменении давления рабочего тела.

7. Измерение уровня воды в барабане парогенераторов.
8. Термоэлектрический метод измерения температур.
9. Измерение скоростей и расхода жидкостей и газов напорными трубками.
10. Измерения уровня жидкостей в конденсаторах, подогревателях и баках.
11. Типовая схема теплотехнического контроля на АЭС с ВВЭР.
12. Общие сведения измерения давления и единицы давления.
13. Расходомеры постоянного перепада давления.
14. Жидкостные приборы давления с видимым уровнем.
15. Тахометрические расходомеры.
16. Классификация научных исследований.
17. Методология научного познания и творчества.
18. Методы теоретических и эмпирических исследований.
19. Элементы теории и методологии научно-технического творчества.
20. Классификация, типы и задачи эксперимента.
21. Метрологическое обеспечение эксперимента.
22. Выбор направления научного исследования.
23. Оценка экономической эффективности эксперимента.
24. Этапы научно-исследовательской работы.
25. Задачи и методы теоретического исследования.
26. Методы исключения грубых ошибок из измерений.
27. Аппроксимация экспериментальных данных.
28. Метод наименьших квадратов.
29. Методы подбора эмпирических формул.
30. Регрессионный анализ.
31. Нормальное распределение.
32. Объединение и сравнение экспериментальных данных.
33. Сглаживание эмпирических данных.
34. Моделирование в научно-техническом творчестве. Теоремы о подобии.
35. Оценка адекватности теоретических решений.
36. Применение вычислительной техники в научных исследованиях.
37. Основы теории планирования эксперимента.
38. Оформление результатов научной работы.

4. Задания для самостоятельного выполнения по дисциплине

4.1. Для регулировки расхода котельной в диапазоне измерений 0,2-0,6 кг/сек приобрели 2 расходомера. Первый с классом точности 0,1% и диапазоном измерений 0-1 кг/сек. Второй с классом точности 0,01 и диапазоном измерений 0-5 кг/сек. Какой расходомер предпочтителен?

4.2. Известно, что класс точности термометра 2, шкала 0-500 градусов Цельсия, термометр показывает 300 градусов, эталон 320 градусов. Соответствует ли прибор заявленному классу точности?

Цель работы: описать основные способы измерения температуры.

Температура является одним из важнейших параметров технологических процессов. Она может быть определена как параметр теплового состояния. Значение этого параметра обуславливается средней кинетической энергией поступательного движения молекул данного тела. Возможность измерять температуру термометром основывается на явлении теплового обмена между телами с различной степенью нагретости и на изменении термометрических (физических) свойств при нагревании.

В соответствии с различными способами измерения, основывающихся на изменении физических свойств, выделяют следующие типы термометров

1. Термометры, основанные на расширении рабочего вещества.
2. Термометры, основанные на изменении давления рабочего вещества.
3. Термометры, основанные на термоэлектрическом способе измерения температур.
4. Термометры, основанные на изменении сопротивления в электрической измерительной цепи.
5. Термометры, основанные на изменении акустических свойств среды.
6. Термометры, основанные на измерении температуры тел по их тепловому излучению.

Термометры, основанные на расширении рабочего вещества

Температура может быть определена как параметр теплового состояния. Значение этого параметра обуславливается средней кинетической энергией поступательного движения молекул данного тела.

Возможность измерять температуру термометром основывается на явлении теплового обмена между телами с различной степенью нагретости и на измерении термометрических (физических) свойств при нагревании.

Основными представителями этого класса приборов являются:

- стеклянные жидкостные термометры;
- dilatометрические термометры;
- биметаллические термометры.

| Термометр | Рабочее тело | Интервал измеряемых температур | Область применения | Принцип действия |
|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---|--|
| стеклянные жидкостные термометры | Ртуть, Э. спирт, керосин пентан | -200÷750С | Лаб-я Пром-ть | тепловое расширение термометрической жидкости, заключенной в термометре |
| dilatометрические термометры | Латунь Медь Сталь | -30÷1000С | Первичные измерительные преобразователи в САУ | Свойства твердого тела изменять свои линейные размеры в зависимости от температуры |
| биметаллические термометры | | -60÷300С | | |

Из жидкостных термометров наибольшее распространение получили ртутные. Они обладают рядом преимуществ благодаря существенным достоинствам ртути, которая не смачивает стекла, сравнительно легко получается в химически чистом виде и при нормальном атмосферном давлении остается жидкой в широком интервале температур (от $-38,87$ до $+356,58^{\circ}\text{C}$). Следует отметить, что давление насыщенных паров ртути при температуре, превышающей $356,58^{\circ}\text{C}$, невелико по сравнению с давлением насыщенных паров других жидкостей. Это дает возможность относительно небольшим увеличением давления над ртутью в капилляре заметно повысить ее температуру кипения, а вместе с тем и расширить температурный интервал применения ртутных термометров.

К числу недостатков ртути с точки зрения термометрии следует отнести сравнительно малый коэффициент расширения

Термометры, основанные на изменении давления рабочего вещества

Действие манометрических термометров основано на использовании зависимости между температурой и давлением рабочего (термометрического) вещества в замкнутой герметичной термосистеме. Манометрические термометры являются техническими приборами и в зависимости от рабочего вещества термосистемы они подразделяются на газовые, жидкостные и конденсационные (парожидкостные).

| Термометр | Рабочее тело | Интервал измеряемых температур | Область применения |
|-----------------|---|--|--|
| газовые | He, N, H ₂ | -150÷600С | Измерение Т жидких и газообразных сред |
| Жидкостный | Пропиловый алкоголь, метансилол, силиконовые жидкости | -150÷300С | |
| Конденсационные | Фреон-22 Пропилен Хлористый метил Ацетон Этилбензол | -25÷80С -50÷60С 0÷125С 100÷200С 160÷300С | |

Манометрические термометры изготавливают показывающие и самопишущие. Показывающие и самопишущие манометрические термометры могут быть использованы для измерения температур во взрывоопасных помещениях. В этом случае привод диаграммной бумаги осуществляется часовым механизмом. Если в этих условиях необходимо иметь термометр с дистанционной передачей показаний на вторичный прибор, то она должна быть пневматической.

Схема устройства показывающего манометрического термометра представлена на рисунке. Термосистема термометра состоит из термобаллона 1, погружаемого в среду, температура которой измеряется, капилляра 2 и манометрической пружины 3. Один конец пружины впаян в держатель 4, канал которого соединяет внутреннюю полость манометрической пружины через капилляр с термобаллоном. Второй свободный конец пружины герметизирован и шарнирно с помощью поводка 5 связан с сектором 6. Этот сектор в свою очередь соединен зубчатым зацеплением с трубкой 7, на оси которой насажена указательная стрелка 8. Для выбора зазора в передаточном механизме установлен спиральный волосок 9, конец внутреннего витка которого закреплен на оси трубки.

Термосистема термометра заполнена рабочим веществом, например газом (или жидкостью), под некоторым начальным давлением. При нагревании термобаллона увеличивается давление газа в замкнутой герметизированной термосистеме, в результате чего пружина деформируется (раскручивается) и ее свободный конец перемещается. Движение свободного конца пружины передаточным механизмом (поводком, сектором и трубкой) преобразуется в перемещение указателя относительно шкалы прибора. По положению указателя на шкале термометра производят отсчет температуры.

Следует отметить, что в отличие от газовых и жидкостных термометров у конденсационных (парожидкостных) термометров термобаллон (рис. 3-2-1, б) частично заполнен конденсатом (примерно на 0,7—0,75 объема), а в верхней части термобаллона над конденсатом находится насыщенный пар этой жидкости. Кроме того, капилляр у этих термометров вставлен на некоторую глубину внутрь термобаллона. Манометрическая пружина и капилляр термометра заполнены тем же конденсатом, что и термобаллон. Давление в термосистеме конденсационного термометра равно давлению насыщенного пара в термобаллоне. При этом зависимость между давлением насыщенного пара и температурой является вполне определенной, однозначной и известной для конденсата, которым заполнена термосистема термометра. При нагревании термобаллона термометра часть конденсата в его паровом объеме с зеркала испаряется, изменяя давление насыщения до значения, соответствующего температуре конденсата в термобаллоне. Это в свою очередь вызывает повышение давления в

термосистеме термометра, под действием которого пружина раскручивается и ее свободный конец с помощью передаточного механизма перемещает стрелку.

Термометры, основанные на термоэлектрическом способе измерения температур,

Термоэлектрический метод измерения температур основан на строгой зависимости термоэлектродвижущей силы (термо –э.д.с.) термоэлектрического термометра от температуры.

Интервал измеряемых температур: до 2500С.

Достоинства:

- высокая степень точности
- возможность централизации контроля температуры путём присоединения нескольких термоэлектрических термометров через переключатель к одному измерительному прибору
- возможность автоматической записи измеряемой температуры
- возможность отдельной градуировки измерительного прибора и термоэлектрического термометра.

Измерение основано на существовании определённой зависимости между термо – э.д.с., устанавливающейся в цепи, составленных из разнородных проводников, и температурами мест их соединения. Если взять цепь, представленную на рисунке, составленную из двух различных термоэлектрически однородных по длине проводников А и В (например, платина и медь), то при подогреве спая 1 в цепи появляется электрический ток, который в более нагретом спая 1 направлен от платины В к меди А, а в холодном спая 2 – от меди к платине. Электродвижущая сила, обусловленная неодинаковыми температурами мест соединения 1 и 2, называется термоэлектродвижущей силой, а создающий её преобразователь – термоэлектрическим первичным преобразователем или термометром (термопара).

Термометры, основанные на изменении сопротивления в электрической измерительной цепи

Интервал измеряемых температур: 260÷1000С

Действие термометров сопротивления основано на свойстве вещества изменять свое электрическое сопротивление с изменением температуры. При измерении температуры термометр сопротивления погружают в среду, температуру которой необходимо определить. Зная зависимость сопротивления термометра от температуры, можно по изменению сопротивления термометра судить о температуре среды, в которой он находится.

Рабочее тело: металлы и полупроводники.

Термометры сопротивления из чистых металлов, получившие наибольшее распространение, изготавливают обычно в виде обмотки из тонкой проволоки на специальном каркасе из изоляционного материала. Эту обмотку принято называть чувствительным элементом термометра сопротивления. В целях предохранения от возможных механических повреждений и воздействия среды (температура, которой измеряется термометром) чувствительный элемент его заключают в специальную защитную гильзу.

Достоинства:

- высокая степень точности
- возможность выпуска измерительных приборов с стандартной градуировкой шкалы, практически на любой температурный интервал
- возможность использования их с информационно-вычислительными машинами

Требования к материалам:

- должны не окисляться
- должен иметь монотонную зависимость сопротивления от температуры
- достаточно высокое значение температурного коэффициента α

Этот коэффициент в общем виде может быть выражен равенством:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt}.$$

Термометры, основанные на изменении акустических свойств среды

Работа данных термометров основана на изменении акустических свойств рабочего тела при изменении температуры. Изменения определяются при пропускании звукового сигнала через рабочую среду. Термометр состоит из приемника – передатчика звукового сигнала (либо другую электромагнитную волну) и сосуда с рабочим телом. Для генерации сигнала используется генератор электромагнитного сигнала. Достоинством данного метода является возможность измерения температуры во взрывоопасных помещениях и в местах, где нет возможности установить другие типы средств измерения.

Термометры, основанные на измерении температуры тел по их тепловому излучению

Интервал измеряемых температур: от 300÷6000С

Область применения: различные отрасли промышленности, а также при проведении научных исследований. Вообще же пирометры могут быть использованы для измерения и более низких температур.

При измерении температуры с помощью пирометров температурное поле объекта измерения не искажается, так как измерение, осуществляемое методами пирометрии излучения, не требует непосредственного соприкосновения с телом какого-либо термоприемника. Поэтому такие методы измерения температур тел принято называть бесконтактными.

Для примера рассмотрим оптический пирометр.

Оптические пирометры или так называемые пирометры визуальные с «исчезающей» нитью переменного накала широко применяются для измерения яркостной температуры в видимой области спектра.

Интервал измеряемых температур для общепромышленных пирометров с исчезающей нитью установлен от 700 до 8000° С в видимой области спектра.

Измерение яркостных температур пирометрами с исчезающей нитью, основано на сравнении в свете эффективной длины волны в видимой области спектра яркости исследуемого тела с яркостью нити пирометрической лампы. При этом в качестве чувствительного элемента (лучеприёмника) для фиксирования наличия или отсутствия равновесия яркостей двух одновременно рассматриваемых изображений тел служит человеческий глаз. Вследствие этого измерения температуры пирометром с исчезающей нитью отличаются субъективностью, что следует иметь в виду при их применении.

Пирометр состоит из первичного преобразователя (телескопа), измерительного прибора и источника питания. Изображение объекта, температуру которого необходимо измерить, с помощью объектива создается в фокальной плоскости телескопа. В этой же плоскости расположена вольфрамовая нить пирометрической лампы.

Окуляр телескопа, предназначенный для наблюдения нити лампы на фоне изображения источника излучения (объекта), может перемещаться вдоль оптической оси, что дает возможность устанавливать необходимую видимость нити лампы на фоне изображения объекта. Для постоянства и ограничения углов входа и выхода в оптической системе телескопа установлены две диафрагмы. При строго определенных значениях входного и выходного углов, размера отверстия входной диафрагмы, диаметра объектива в свету, фокусного расстояния окулярной линзы и диаметра выходного зрачка (выходной диафрагмы) телескопа, а также некоторых других размеров достигается независимость показаний оптического пирометра от изменения положения объектива относительно фокальной плоскости, а следовательно, и от изменения расстояния от источника излучения до объектива.

Между окуляром и выходной диафрагмой находится стеклянный красный светофильтр для монохроматизации пучка лучей, попадающих в глаз наблюдателя. Этот светофильтр можно вывести из поля зрения для облегчения наводки и фокусировки телескопа при небольшой яркости источника излучения, но в момент уравнивания яркости и измерения он должен быть обязательно введен в поле зрения. Накал нити пирометрической лампы, а следовательно, и ее яркость зависят от протекающей по нити силы тока, которая регулируется с помощью реостата.

При фокусировке телескопа объектив перемещают вдоль оптической оси, добиваясь резкой видимости объекта и совпадения плоскости его изображения с плоскостью нити лампы. Когда

Цель работы: Изучить методы измерения давления и разности давлений.

Общая часть.

При измерении давления инженера может интересовать *абсолютное, избыточное и вакуумметрическое* давления.

Абсолютное давление – это полное давление, под которым находится жидкость, газ или пар. Оно равно сумме избыточного и атмосферного давлений.

Избыточное давление – это разность между абсолютным давлением, большим атмосферного, и атмосферным давлением.

Вакуумметрическое давление – это разность между атмосферным давлением и абсолютным давлением, меньше атмосферного.

Барометр – прибор измеряющий атмосферное давление.

Манометр – прибор измеряющий абсолютное, избыточное и вакуумметрическое давления.

Соотношение между применяемыми единицами давления

| Единицы | Па | кгс·м ⁻² | кгс·см ⁻² | мм вод. ст. | мм рт. ст. |
|------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|-------------|-----------------------|
| 1 Па | 1 | 0,10197 | $10,197 \cdot 10^{-6}$ | 0,101197 | $7,50 \cdot 10^{-3}$ |
| 1 кгс·м ⁻² | 9,80665 | 1 | 10^{-4} | 1 | $73,56 \cdot 10^{-3}$ |
| 1 кгс·см ⁻² | $98,0665 \cdot 10^3$ | 10^4 | 1 | 10^4 | 735,56 |
| 1 мм вод. ст. | 9,80665 | 1 | 10^{-4} | 1 | $73,56 \cdot 10^{-3}$ |
| 1 мм рт. ст. | 133,322 | 13,595 | $13,595 \cdot 10^{-4}$ | 13,595 | 1 |

Жидкостные приборы давления с видимым уровнем.

Приборы U-образные и чашечные.

Приборы U-образные (двухтрубные) и чашечные (однотрубные) относятся к группе жидкостных приборов с видимым уровнем. Они применяются в качестве манометров (напорометров) для измерения избыточного давления воздуха и неагрессивных газов до 700 мм вод. ст. (7000 Па) и 735 мм рт. ст. (0,1 МПа), тягомеров для измерения разрежения газовых сред до 700 мм вод. ст. (7000 Па), вакуумметров для измерения вакуума (разрежения) до 760 мм рт. ст. (0,101 МПа) и дифференциальных манометров для измерения разности давлений неагрессивных газов, находящихся под давлением, близким к атмосферному, до 700 мм вод. ст. (7000 Па) и неагрессивных жидкостей, газов и паров, находящихся под давлением более 1 кгс/см² (0,1 МПа), до 700 мм рт. ст. (0,09 МПа).

Приборы U-образные и чашечные используются в промышленности как местные приборы, т. е. они устанавливаются на площадках обслуживания или на отдельных элементах технологического оборудования.

Приборы этого типа применяют в качестве контрольных и образцовых манометров и вакуумметров для проверки рабочих приборов, рассчитанных на те же диапазоны измерения давления, разрежения или разности давлений.

На рис. 9-1-1 показана схема U-образного (двухтрубного) манометра. Он состоит из U-образной стеклянной трубки, заполняемой примерно до половины своей высоты рабочей жидкостью,

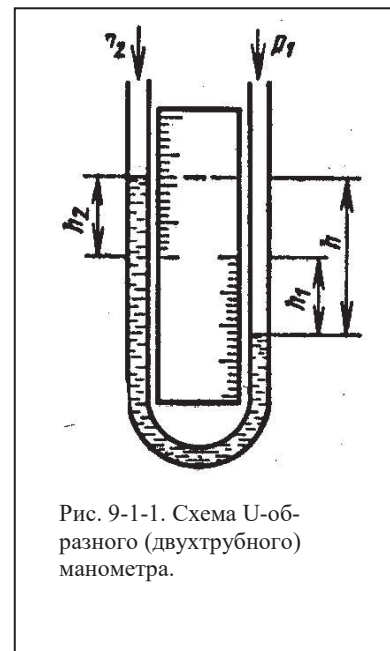


Рис. 9-1-1. Схема U-образного (двухтрубного) манометра.

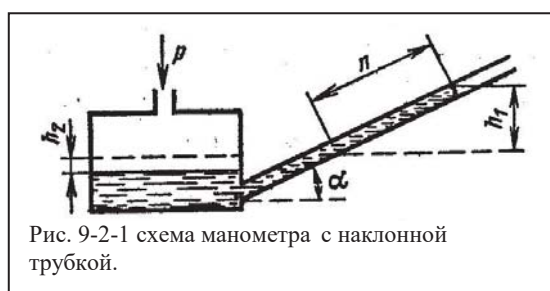
и шкалы, позволяющей производить отсчет уровней в обоих коленах. Измеряемое давление, разрежение или разность давлений уравнивается и измеряется столбом h рабочей жидкости, определяемым как сумма столбов h_1 и h_2 в обоих коленах. При этом устраняется погрешность из-за некоторого возможного различия сечений обоих колен U-образной трубки.

Микрометры.

Микроманометры являются переносными приборами, их применяют в лабораторной практике и в промышленных условиях при проведении испытаний теплосиловых и других установок для измерения малых давлений, разрежений или разностей давлений воздуха и неагрессивных газов. Приборы этого типа в зависимости от их назначения подразделяются на рабочие и образцовые микроманометры. Рабочие микроманометры в свою очередь подразделяются на приборы технические и повышенной точности.

На рис. 9-2-1 показана схема

микроманометра с наклонной стеклянной измерительной трубкой. Наклон измерительной трубки в этом приборе сделан с целью уменьшения погрешности измерений. В качестве рабочей жидкости в микроманометрах этого типа применяют этиловый спирт, который заливают в широкий сосуд настолько, чтобы уровень его в наклонной трубке находился против нулевой отметки шкалы. Длина шкалы у микроманометров с наклонной трубкой выполняется обычно равной 250 мм. При измерении давления в каком-либо объекте к нему присоединяют с помощью трубки широкий сосуд прибора, а при измерении разрежения — наклонную трубку. В случае измерения разности давлений большее давление подается в сосуд, а меньшее — в измерительную трубку.



Приборы давления с упругими чувствительными элементами.

Общие сведения и основные свойства упругих чувствительных элементов

Приборы давления, основанные на использовании деформации или изгибающего момента упругих чувствительных элементов, воспринимающих измеряемое давление среды и преобразующих его в перемещение или усилие, применяют в различных областях техники в широком диапазоне измерений — от 5 кгс/м² (50 Па) до 10 000 кгс/см² (1000 МПа). Они изготавливаются в виде тягомеров, напорометров, тягонапорометров, манометров, вакуумметров и мановакуумметров. Эти приборы подразделяются на следующие разновидности:

1. Приборы давления прямого действия — показывающие и самопишущие, у которых перемещение центра или свободного конца упругого чувствительного элемента, вызываемое действием давления, при помощи дополнительного механизма преобразуется в перемещение отсчетного устройства для показания или для показания и записи измеряемой величины.
2. Приборы давления прямого действия и реле давления (без отсчетных устройств), снабженные электроконтактами и предназначенные для целей измерения и сигнализации или только сигнализации отклонения давления от заданного значения, а также для работы в схемах защиты, блокировки или позиционного регулирования.

3. Первичные приборы давления с отсчетными устройствами или без них, снабженные передающими преобразователями с унифицированными выходными сигналами переменного тока или пневматическим и составляющие с взаимозаменяемыми вторичными показывающими или самопишущими приборами отдельные измерительные комплекты. Некоторые приборы этого типа используются также в системах автоматического регулирования и управления.

4. Первичные приборы давления с отсчетными устройствами или без них, снабженные передающими преобразователями с унифицированным выходным сигналом постоянного тока и предназначенные для работы с взаимозаменяемыми вторичными показывающими или самопишущими приборами в системах автоматического регулирования и с информационно-вычислительными машинами.

Упругие чувствительные элементы.

Ниже рассматриваются наиболее распространенные типы упругих чувствительных элементов, применяемых в приборах давления, а также в дифференциальных манометрах. Плоские мембраны.

Плоские мембраны, изготавливаемые из стали и бронзы, представляют собой круглые тонкостенные пластины постоянной толщины. Под действием равномерно распределенного давления или сосредоточенной силы заделанная по краям плоская мембрана прогибается при наличии не только изгибных деформаций, но и растягивающих напряжений и вследствие этого имеет нелинейную статическую характеристику $\lambda = f(p)$. При использовании плоских мембран в качестве рабочего участка используется обычно небольшая часть возможного хода ее.

Плоские мембраны находят применение главным образом в приборах давления специальных конструкций, например пьезокварцевых, емкостных, индуктивных, с тензопреобразователями и т. д. Приборы этого типа обладают малой инерционностью и их можно использовать для измерения переменных давлений с частотой до нескольких сотен и тысяч герц.

Выпуклые мембраны.

Выпуклые (хлопающие) мембраны, изготавливаемые из стали или бронзы, могут быть использованы в реле давления для сигнализации отклонения давления от заданного значения. При воздействии давления p на мембрану ее прогиб λ , на начальном участке статической характеристики возрастает плавно. Далее при увеличении давления происходит потеря устойчивости мембраны и она изменяет свой прогиб скачком. При этом мембрана замыкает или размыкает электроконтакты. При дальнейшем увеличении давления прогиб мембраны на участке характеристики будет снова возрастать монотонно. Если давление уменьшится до значения, то мембрана также скачком возвращается на участок характеристики. Размеры «хлопающих» мембран обычно подбирают опытным путем.

Гофрированные мембраны и мембранные коробки.

Гофрировка поверхности мембраны в виде кольцевых волн значительно повышает надежность ее работы и спрямляет характеристику мембраны. На рис. 10-2-3 показаны наиболее распространенные формы профилей гофрированных мембран. Гофрированные одиночные мембраны в качестве чувствительных элементов применяются редко. Наибольшее применение в приборах давления (тягомерах, напоромерах, дифманометрах и других приборах) получили



Рис. 10-2-3. Формы профилей гофрированных мембран.
а — синусоидальная; б — трапеци-
дальная; в — пильчатая.

мембранные коробки, образованные двумя спаянными или сваренными гофрированными мембранами (рис. 10-2-4, а), и блоки из двух или нескольких мембранных коробок (рис. 10-2-4, б).

В тех случаях, когда необходимо иметь минимальный объем внутренних полостей чувствительного элемента, например при измерении перепада давления (что является желательным особенно для дифманометров-расходомеров), применяют блок, состоящий из двух складывающихся мембранных коробок с жидкостным заполнением (рис. 10-2-4, в). Такой мембранный блок, разработанный на заводе «Манометр», не теряет своих свойств в случае перегрузки давлениями p_1 и p_2 . Если фактическая разность давлений $p_1 - p_2$ превышает верхний предел измерений, на который рассчитан прибор, или одна из мембранных коробок находится под воздействием односторонней перегрузки давлением, повреждения мембранной коробки не произойдет, так как обе мембраны сложаются по профилю, вытеснив жидкость во вторую коробку.

Неметаллические мембраны.

Кроме металлических мембран в напоромерах, тягомерах, дифманометрах, измеряющих малые давления и разности давлений, применяют неметаллические (вялые) мембраны. Эти мембраны изготовляют из специальной сетчатой ткани (капрона, шелка), покрытой бензомаслостойкой резиной или пластмассой.

Неметаллические мембраны, как правило, снабжаются жестким центром, диаметр которого обычно составляет примерно 0,8 рабочего (рис. 10-2-6, а). Для обеспечения постоянства эффективней площади кольцевая часть мембраны выполняется с гофром, отформованным при изготовлении ее.

Сильфоны.

Сильфон представляет собой тонкостенную трубку с поперечной гофрировкой (рис. 10-2-7, а).

Сильфоны применяются в напоромерах и тягомерах для измерения небольшого давления до 4000 кгс/м^2 ($40\,000 \text{ Па}$), в приборах для измерения вакуумметрического давления до 1 кгс/см^2 ($0,1 \text{ МПа}$), абсолютного давления до 25 кгс/см^2 ($2,5 \text{ МПа}$), избыточного давления до 600 кгс/см^2 и разности давлений до $2,5 \text{ кгс/см}^2$ ($0,25 \text{ МПа}$). Сильфоны при работе на сжатие выдерживают давление в 1,5—2 раза большее, чем при воздействии давления изнутри.

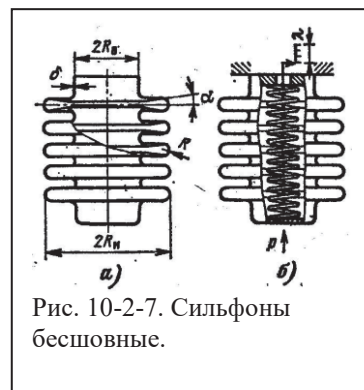


Рис. 10-2-7. Сильфоны бесшовные.

Трубчатые пружины.

Трубчатые пружины чаще всего выполняются в виде одновитковых, центральная ось которых представляет собой дугу окружности с центральным углом γ , равным $200—270^\circ$ (рис. 10-2-9, а). Из числа этих пружин наиболее широкое применение получили пружины Бурдона эллиптического (рис. 10-2-9, б) и плоскоовального (рис. 10-2-9, в, г) сечения. Большая ось $2a$ поперечного сечения расположена перпендикулярно радиусу кривизны ρ_k центральной оси (среднему радиусу) пружины. Один конец пружины Бурдона закрепляют неподвижно, а другой — свободный, закрытый пробкой и запаянный — соединяют с механизмом прибора, передающим преобразователем или другим устройством. Тонкостенные пружины Бурдона применяют в приборах для измерения

вакуумметрического давления до 1 кгс/см² (0,1 МПа) и избыточного давления до 60 кгс/см² (6 МПа). Для измерения избыточного давления до 200 — 1600 кгс/см² (20—160 МПа) применяют толстостенные пружины овального сечения (рис. 10-2-9, в, з).



ПРИБОРЫ ДАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ

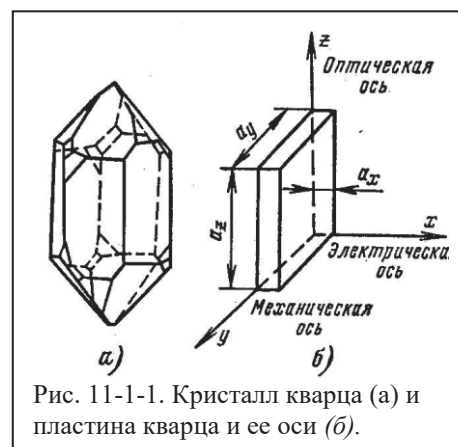
Общие сведения. Электрические приборы, применяемые в технике для измерения давления различных сред, используются главным образом для исследовательских целей. В основу действия этих приборов положены различные физические явления, например возникновение электростатических зарядов при деформации некоторых кристаллов в определенном направлении, изменение электрического сопротивления проводников при воздействии измеряемого давления, изменение индуктивности или электрической емкости и т. д. Следует отметить, что емкостные приборы давления имеют весьма ограниченное применение вследствие малой чувствительности и зависимости характеристик от температуры.

Пьезоэлектрические манометры.

Действие манометров этого типа основано на использовании пьезоэлектрического эффекта, наблюдаемого у ряда кристаллов (кварца, турмалина, титаната бария, сегнетовой соли и др.). Пьезоэлектрические манометры, использующие в качестве первичного преобразователя кварц (двуокись кремния SiO₂), нашли Наибольшее практическое применение по сравнению с приборами, использующими другие кристаллы, благодаря существенным достоинствам кварца, который негигроскопичен, обладает большой механической прочностью, хорошими изоляционными качествами и независимостью пьезоэлектрических свойств от температуры сравнительно в широком интервале (20—400°С).

У кристалла кварца (рис. 11-1-1, а) различают следующие оси: оптическую, проходящую через вершины кристалла; электрическую, перпендикулярную оптической и проходящую через ребра (их три со сдвигом в 120°); механическую (или нейтральную), которая расположена нормально к граням кристалла (их также три).

Если из кристалла кварца вырезать прямоугольную пластину (рис. 11-1-1, б) с гранями, параллельными осям (срез Кюри), и подвергнуть ее сжатию (или растяжению) вдоль электрической оси, то на гранях, перпендикулярных этой оси, появятся электро-



статические заряды, равные по значению и противоположные по знаку. При переходе от сжатия к растяжению и обратно знаки зарядов меняются в соответствии с изменением знака силы, действующей вдоль электрической оси.

Значение Q_x заряда, возникающего вследствие действия силы F_x вдоль электрической оси, или давления p_x , действующего на площадь грани $S_x = a_y a_z$, равно:

$$Q_x = kF_x = kp_x S_x$$

где k — пьезоэлектрическая постоянная или пьезоэлектрический модуль, Кл/Н.

Коэффициент k не зависит от размеров кристалла, однако его значения различны для разных пород кварца. Значение k для применяемого кварца равно $2,1 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н.

Манометры сопротивления.

Действие манометров сопротивления основано на изменении электрического сопротивления веществ под действием внешнего избыточного давления. К числу таких веществ относятся полупроводники, платина, манганин, константан, вольфрам и ряд других металлов. Для целей измерения давления, а следовательно, и изготовления первичного преобразователя (или чувствительного элемента), как показали экспериментальные исследования, в наибольшей степени подходит манганин.

Манганин имеет линейную зависимость приращения электрического сопротивления ΔR от давления p :

$$\Delta R = kRp$$

где k — коэффициент изменения сопротивления манганина, $\text{см}^2/\text{кгс}$.

Линейная зависимость сопротивления манганина подтверждается опытными данными вплоть до давления $30\,000 \text{ кгс/см}^2$ (3000 МПа). Кроме того, он обладает очень малым температурным коэффициентом электрического сопротивления, что дает возможность не считаться. При измерении давления с изменениями температуры окружающего прибор воздуха. Небольшая чувствительность преобразователя ограничивает применение этого манометра измерением сверхвысоких давлений (более 1000 кгс/см^2 или 100 МПа).

Коэффициент k манганина для разных партий лежит в интервале от $2,34 \cdot 10^{-6}$ до $2,51 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{кгс}$, и манометры с преобразователем из манганиновой проволоки требуют индивидуальной градуировки.

| | |
|--|---|
| Общая часть. | 2 |
| Жидкостные приборы давления с видимым уровнем. | 2 |
| Приборы U-образные и чашечные. | 2 |
| Микрометры. | 3 |
| Приборы давления с упругими чувствительными элементами. | 3 |
| Выпуклые мембраны. | 4 |
| Неметаллические мембраны. | 5 |
| Сильфоны. | 5 |
| Трубчатые пружины. | 5 |
| ПРИБОРЫ ДАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ. | 6 |
| Пьезоэлектрические манометры. | 6 |
| Манометры сопротивления. | 7 |

Введение.

Расход теплоносителя в главных циркуляционных петлях (ГП) первого контура реактора является одним из основных параметров, необходимых для определения теплосъема, а следовательно, и тепловой мощности энергоблока АЭС. Точные и оперативные измерения расхода теплоносителя дают возможность установить постоянный контроль теплового режима реактора, поддерживать оптимальный режим работы АЭС. Особенно важно достоверно знать расход в период пусконаладочных работ на энергоблоке, когда необходимо установить соответствие его величины проектным значениям.

В настоящее время основным методом определения расхода теплоносителя первого контура в ГП ядерного реактора типа ВВЭР является метод, основанный на измерении перепада давления (напора) на главных циркуляционных насосах (ГЦН). Расход теплоносителя при этом определяют по паспортным напорным характеристикам, которые получают на заводе-изготовителе в результате испытания выемных частей ГЦН на специальных стендах, имитирующих условия главного циркуляционного контура реактора. Однако стендовые испытания не позволяют получить напорные характеристики во всем диапазоне значений напоров и расходов теплоносителя, возможных при работе ГЦН в реальных условиях. Это приводит к необходимости экстраполяции полученных в стендовых испытаниях данных на область больших расходов теплоносителя, наблюдающихся при работе реактора в режимах с частично отключенными ГЦН. Погрешность определения расхода теплоносителя в ГП по напорным характеристикам составляет, как правило, 5—6 %.

Более точно расход теплоносителя первого контура в ГП можно определить сведением баланса тепла между первым и вторым контурами реактора. По теплотехническим параметрам второго контура определяют тепловую мощность ГП, а расход теплоносителя первого контура получают как частное от деления этой мощности на приращение энтальпии в данной ГП. Однако подобный метод не оперативен и позволяет получить приемлемую точность определения расхода теплоносителя лишь в стационарных режимах работы реактора на уровнях тепловой мощности, близких к номинальной. Как правило, этот метод используется для уточнения напорных характеристик ГНЦ.

Характеристики имеющихся штатных методов определения расхода теплоносителя первого контура реакторов типа ВВЭР нельзя признать удовлетворительными. Необходима разработки новых, независимых методов, основанных на использовании других физических принципов. Применение независимых методов вместе с имеющимися штатными позволит повысить точность и надежность измерения расхода теплоносителя первого контура. Одним из таких методов может быть радиационный метод, основанный на регистрации спада активности изотопа ^{16}N в теплоносителе первого контура при прохождении его в ГП. Он будет рассмотрен нами в конце. А пока остановимся на уже существующих способах измерения расхода теплоносителя на энергетических установках.

Контроль скорости движения теплоносителя осуществляется с помощью преобразователей расхода и расходомеров.

Расход – это количество (масса или объем) вещества, протекающего через данное сечение трубопровода (канала) в единицу времени.

Расходомер — это прибор или устройство из нескольких частей, измеряющий расход вещества (жидкости, газа или пара).

К этим терминам надо добавлять название измеряемого вещества, например: расходомер пара, счетчик воды, расходомер газа со счетчиком.

Преобразователь расхода — это устройство, непосредственно воспринимающее расход (например, диафрагма, сопло, напорная трубка) и преобразующая его в другую

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

величину (например, в перепад давления), удобную для измерения.

Количество прошедшего вещества измеряется или в единицах массы (килограмм, тонна, грамм) или в единицах объема (кубический метр, кубический сантиметр и т. д.).

Массовый расход q_m измеряется в единицах массы, деленных на единицу времени (килограмм в секунду — кг/с, килограмм в час — кг/ч и т. д.).

Объемный расход q_o измеряется в единицах объема, деленных на единицу времени (кубических метрах в секунду — м³/с, кубических метрах в час — м³/ч и т. д.).

Так как содержание газа в единице объема сильно зависит от давления и температуры, то результаты измерения объемного расхода газа надо приводить к стандартным условиям, т. е. к температуре $T = 293,15$ К и давлению $p = 101\,325$ Па (760 мм рт. ст.).

Классификация расходомеров, используемых на ЭУ.

По принципу действия расходомеры подразделяются на следующие группы:

А) Расходомеры, основанные на гидродинамических методах:

- 1) переменного перепада давления;
- 2) постоянного перепада давления (ротаметры)
- 3) переменного уровня;
- 4) обтекания;
- 5) вихревые;
- 6) парциальные.

Б) Приборы с непрерывно движущимся телом:

- 1) тахометрические;
- 2) силовые (в том числе вибрационные).

В) Приборы, основанные на различных физических явлениях:

- 1) тепловые;
- 2) электромагнитные;
- 3) акустические;
- 4) оптические;
- 5) ядерно-магнитные;
- 6) ионизационные.

Г) Приборы, основанные на особых методах:

- 1) корреляционные;
- 2) меточные;
- 3) концентрационные.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

Современные требования к расходомерам

Эти требования многочисленны и разнообразны. Удовлетворить совместно все требования очень трудно, если не невозможно. Одни типы приборов в большей мере удовлетворяют одним требованиям, а другие – другим. Поэтому при выборе того или иного типа прибора следует исходить из сравнительной важности тех или других требований, предъявляемых к измерению расхода в каждом конкретном случае.

1. Высокая точность измерения. Это важнейшее требование, особенно когда надо измерять не мгновенный расход, а количество (массу или объем) прошедшего вещества. Если раньше погрешность измерения в 1,5-2 % считалась приемлемой, то теперь нередко требуется иметь погрешность не более 0,2-0,5 %. Эта весьма малая погрешность уже достигнута в камерных счетчиках жидкостей (лопастных, роликово-лопастных) и ряде других счетчиков. Но такие счетчики не предназначены для больших диаметров труб. Здесь преимущественно применяют расходомеры с сужающими устройствами. Для повышения их сравнительно ограниченной точности используют преобразователи давления, температуры или плотности, измерительные сигналы которых поступают в вычислительные устройства, вносящие коррекцию в показания расходомера-дифманометра. Имеются расходомеры с погрешностью всего 0,25-1,0 % (тахометрические, вихревые, электромагнитные, ультразвуковые), но не все из них пригодны для больших трубопроводов.

2. Высокая надежность. Это второе важнейшее требование. Оно оценивается временем, в течение которого прибор сохраняет работоспособность и достигнутую точность. Это время зависит от типа прибора и от условий его применения. Некоторые расходомеры и их элементы, не имеющие движущихся частей, могут надежно работать очень долго. Но тахометрические расходомеры и счетчики с движущимся ротором имеют много меньший срок службы, зависящий от степени чистоты измеряемого вещества и его смазывающей способности. В технических условиях на некоторые турбинные расходомеры установлен шестилетний межповерочный срок нормальной работы.

3. Малая зависимость точности измерения от изменения плотности вещества. Лишь тепловые и силовые расходомеры, измеряющие массовый расход, обладают этим ценным свойством. У других типов приборов надо иметь устройства, автоматически вводящие коррекцию на изменение плотности или хотя бы температуры и давления измеряемого вещества. Это особенно необходимо при измерении расхода газа.

4. Быстродействие прибора или его высокие динамические характеристики. Это требование важно, когда расходомер применяют в системах автоматического регулирования и при измерении быстроменяющихся расходов. Быстродействие удобно оценивать значением постоянной времени T прибора, т. е. временем, в течение которого его показания при скачкообразном изменении расхода от $q \pm$ до $q\%$ изменяются приблизительно на две трети от значения $(q_2 - q_1)$. Имеется очень большая градация быстродействия от T , измеряемого сотыми (и еще менее) долями секунды от турбинных, до T , измеряемого десятками секунд у тепловых расходомеров.

Для улучшения быстродействия последних применяют особые (дифференцирующие) измерительные схемы. Расходомеры с сужающими устройствами (СУ) занимают промежуточное положение. Их время T тем меньше, чем короче соединительные трубки, чем меньше измерительный объем дифманометра и чем больше его предельный перепад давлений.

5. Большой диапазон изменения (q_{\max}/q_{\min}). У приборов с линейной характеристикой

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

он равен 8-20 и более, а у расходомеров с СУ, имеющих квадратичную характеристику, он равен лишь 3-10. В случае необходимости его можно повысить до 16, подключая к СУ два дифманометра с разными Δp_{max} .

6. Обеспеченность метрологической базой. Образцовые расходомерные установки, необходимые для градуировки и поверки различных расходомеров, сложны и дороги, особенно при больших поверяемых расходах. В стране их сравнительно немного, и предназначены они преимущественно для поверки расходомеров воды и водосчетчиков.

7. Очень большой диапазон расходов, подлежащих измерению. Для жидкости надо измерять расходы в пределах от 10^{-2} до 10^7 - 10^8 кг/ч, а для газов — в пределах от 10^{-4} до 10^5 - 10^6 кг/ч, т. е. расходы, отличающиеся на десять порядков. Особые трудности возникают при измерении как очень малых, так и очень больших расходов. Здесь нередко приходится применять особые методы измерения, например парциальный (при больших расходах). Относительно проще измерять средние расходы.

8. Необходимость измерения расхода не только в обычных, но и в экстремальных условиях, при очень низкой или очень высокой температуре и давлении. Так, расход перегретого пара сверхвысокого давления и расход расплавленных металлов теплоносителей — при температурах, достигающих $+600$ °С. Подобные условия создают дополнительные трудности для обеспечения надежного измерения расхода.

9. Широкая номенклатура измеряемых веществ. Вещества могут быть не только однофазными и однокомпонентными, но также многофазными и многокомпонентными. При этом надо учитывать как особые свойства вещества (агрессивность, абразивность, токсичность, взрывоопасность и т. д.), так и его параметры (давление, температура). Особая задача — измерение расхода расплавленных металлов — теплоносителей. Между тем основные методы измерения расхода были разработаны для однофазных сред (для жидкости, газа и пара). Теперь же все актуальнее становится задача измерения двухфазных и даже иногда трехфазных веществ. Измерение их расхода очень важно, хотя и представляет определенные трудности.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

Сравнительный анализ расходомеров используемых на ЭУ.

Наибольшее распространение получили следующие способы измерения расхода: переменного перепада давления на сужающих устройствах; акустические (ультразвуковые); электромагнитные; вихревые; тахометрические.

До настоящего времени на ядерных энергетических установках традиционно в основном применяются расходомеры переменного перепада давления на сужающих устройствах (диафрагмах, соплах, трубах Вентури). Эти расходомеры обладают рядом **достоинств**, основными из которых являются: высокая надежность измерений и низкая зависимость качества измерений от физико-химических свойств измеряемой жидкости. Однако эти приборы имеют и **недостатки**, например, такие как: узкий динамический диапазон, нелинейность характеристик, квадратичная зависимость между расходом и перепадом давления, а следовательно, неравномерность шкалы, высокое гидравлическое сопротивление, оказываемое потоку жидкости первичным преобразователем, необходимость демонтажа для ежегодной поверки, сложность эксплуатации, сложный монтаж, требуемые длинные прямые участки трубопровода (до и после места установки ППР). Эти недостатки затрудняют применение данных приборов, и становятся очевидными в сравнении с преимуществами, создаваемыми применением современных приборов других типов.

Расходомеры переменного перепада давления применяются в штатных системах контроля расхода на всех АЭС в устройствах второй и третьей групп измерений, например, для контроля расхода воды, пара, газа по петлям, по коллекторам и т. д. Применяются они в некоторых случаях измерений расхода в технологических каналах, а также при экспериментальных измерениях.

ППР установлены на первой АЭС. Опыт их эксплуатации показал, в частности, высокую надежность, однако возникали сложности с заменой импульсных трубок.

Для выполнения измерений расхода на трубопроводах большого диаметра, по-видимому, наиболее перспективными являются ультразвуковые расходомеры. На многих источниках тепловой энергии расходомеры данного типа постепенно вытесняют традиционные расходомеры переменного перепада давления.

Ультразвуковые датчики расхода обладают следующими преимуществами: не создают гидравлического сопротивления потоку среды, обеспечивают сравнительно широкий динамический диапазон и высокую линейность измерений, имеют высокую точность и надежность, могут поверяться беспробивными (имитационными) методами без демонтажа с трубопровода.

Для ультразвуковых расходомеров характерны требуемые длинные прямые участки, необходимость выполнения высокоточных линейных измерений при монтаже, чувствительность к “завоздушиванию” среды, чувствительность к состоянию внутренней поверхности трубопровода (если применяются накладные датчики расхода).

Появление многолучевых ультразвуковых расходомеров позволило сократить длины прямых участков в несколько раз, применение измерительных участков, изготовленных в заводских условиях, исключает необходимость выполнения высокоточных линейных измерений непосредственно на трубопроводе, возможность выбора между врезными и накладными датчиками позволяет учесть состояние внутренней поверхности трубопровода. Можно выделить следующие основные методы ультразвуковых измерений: временной метод; корреляционный метод; частотный, фазовый и доплеровский методы.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

НГТУ – 070500 – (М08 – АЭ – 2) – Р

Лист

8

Временной метод измерения основан на излучении в акустический канал расходомера, расположенный под углом к вектору скорости потока жидкости, ультразвуковых сигналов по направлению потока и против него. Измеренная разность времен прохождения сигналов определяется скоростью потока жидкости. Данный метод измерения получил наибольшее распространение.

Частотный метод заключается в измерении разности частот повторения коротких ультразвуковых импульсов или “пакетов” ультразвуковых колебаний, направляемых одновременно по потоку и против него. Измеренная разностная частота пропорциональна скорости потока.

Доплеровский метод измерений основан на эффекте Доплера и является разновидностью частотного метода.

Преимуществами рассмотренных ультразвуковых методов измерений являются: возможность обеспечения высокого быстродействия расходомеров, позволяющего измерять с высокой точностью пульсирующие расходы с частотой пульсаций до 10^4 Гц.

Недостатки - высокая зависимость качества измерений от физико-химических свойств жидкости (ее температуры, давления, концентрации и т.п.), от профиля распределения скоростей потока жидкости и от точности монтажа первичных преобразователей.

Корреляционный метод измерения основан на измерении времени перемещения неоднородностей потока между двумя заданными сечениями трубопровода. Неоднородности потока модулируют ультразвуковые сигналы, распространяющиеся в плоскости упомянутых сечений. Ввиду малости расстояния, которое проходит поток жидкости между этими сечениями, сигналы в них модулируются приблизительно одинаково одними и теми же неоднородностями. Для определения скорости потока измеряется время между появлением сигналов с максимальным коэффициентом корреляции в заданных сечениях трубопровода.

Для корреляционного метода измерения характерны большой динамический диапазон, слабая зависимость точности измерений от физико-химических свойств жидкости, качества трубопровода и от точности монтажа первичных преобразователей. Недостаток метода - большое время реакции прибора на изменение расхода.

Частота ультразвуковых колебаний обычно выбирается близкой к 1 МГц.

Ультразвуковые расходомеры для трубопроводов небольших диаметров, как правило, изготавливаются с измерительными участками, на которых установлены врезные ППР.

Проверка ультразвуковых расходомеров может выполняться имитационным или проливным методами.

На источниках тепловой энергии распространена ситуация, когда имеется большое число точек измерения расхода (подающие, обратные магистрали, подпиточные трубопроводы, технологические трубопроводы и т.д.). Поэтому совершенно необходимо, чтобы расходомеры имели аппаратные и программные средства организации информационной сети.

Принцип действия электромагнитных расходомеров основан на измерении ЭДС, индуцированной в электропроводной жидкости, которая движется, пересекая силовые линии постоянного или переменного магнитного поля (эффект Фарадея).

Электромагнитные расходомеры обеспечивают высокую точность измерений (часто применяются в качестве образцовых приборов), практически нечувствительны к загрязнению и физико-химическим свойствам жидкости (единственное ограничение для современных приборов – жидкость должна быть электропроводной с удельной проводимостью не менее 10^{-5} См/м), имеют широкий динамический диапазон (до 200) и способны измерять очень малые расходы, создают минимальное гидравлическое сопротивление потоку, нечувствительны к осесимметричным изменениям профиля

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

НГТУ – 070500 – (М08 – АЭ – 2) – Р

Лист

9

распределения скоростей потока, имеют высокое быстродействие, не требуют длинных прямых участков до и после места установки прибора.

Электромагнитные расходомеры, в основном, применяются на трубопроводах небольшого диаметра (до Ду300).

Электромагнитные расходомеры для трубопроводов большого диаметра существенно отличаются от электромагнитных расходомеров для трубопроводов небольшого диаметра. До настоящего времени данные приборы не получили широкого распространения. По-видимому, это объясняется сложностью их монтажа, недостаточной стабильностью характеристик, необходимостью поверки проливным методом (поверочные проливные стенды для труб большого диаметра уникальны и имеются только в Казани, Москве, С.-Петербурге).

Вихревой метод измерения расхода основан на измерении частоты отрыва вихрей (вихревая “дорожка Кармана”), возникающих при обтекании потоком жидкости погруженного в нее тела обтекания. Частота вихрей пропорциональна средней скорости потока, а амплитуда колебаний давления – пропорциональна квадрату средней скорости (скоростному напору). Измерение частоты может выполняться при помощи ультразвуковых или электромагнитных датчиков, датчиков давления. Вихревой метод применяется также для измерения расхода пара и газовых сред.

Для вихревых расходомеров характерны следующие **положительные особенности**: они малочувствительны к физико-химическим свойствам жидкости, одинаково удобны для выполнения измерений на трубопроводах малых и больших диаметров, обеспечивают хорошую точность измерений и быстродействие.

Для трубопроводов малых диаметров вихревые расходомеры обычно конструктивно выполняются вместе с измерительным участком. Для трубопроводов большого диаметра применяются расходомеры погружного типа (тело обтекания размещается по оси потока на специальной штанге).

Однако данные расходомеры не получили широкого распространения. По-видимому, это объясняется присущими им **недостатками**. В частности, тело обтекания создает дополнительное гидравлическое сопротивление потоку, легко загрязняется и поэтому перед расходомером необходимо устанавливать фильтр (который также увеличивает гидравлическое сопротивление). Характеристики расходомера недостаточно стабильны, динамический диапазон недостаточно широк (соизмерим с динамическим диапазоном ультразвуковых расходомеров и в несколько раз меньше динамического диапазона электромагнитных расходомеров), требуемые прямые участки довольно велики – (10..20)Ду.

Тахометрические расходомеры основаны на измерении частоты вращения аксиальной или тангенциальной лопастной турбинки. Поток, воздействуя на наклонные лопасти турбинки, сообщает ей вращательное движение с угловой скоростью, пропорциональной расходу.

Такие расходомеры обеспечивают высокие точность измерений и чувствительность, малоинерционны, слабочувствительны к физико-химическим свойствам жидкости, не требуют длинных прямых участков (4..5Ду). До недавнего времени их неоспоримым и решающим достоинством была относительно невысокая цена.

Вместе с тем, турбинные расходомеры быстро загрязняются и выходят из строя, имеют трущиеся механические части, узкий динамический диапазон, создают значительное гидравлическое сопротивление, которое увеличивается из-за обязательной установки фильтра. В связи с уменьшением цен на электромагнитные приборы, ценовая привлекательность турбинных расходомеров перестала быть решающей.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

НГТУ – 070500 – (М08 – АЭ – 2) – Р

Лист

10

Расходомеры переменного перепада давления

1. Классификация расходомеров переменного перепада давления

Расходомером переменного перепада давления называется измерительный комплекс, основанный на зависимости от расхода перепада давления, создаваемого преобразователем расхода, установленным в трубопроводе, или элементом последнего (например, коленом).

В состав измерительного комплекса входят:

первичный преобразователь расхода;

первичная линия связи — соединительные трубки и вспомогательные устройства на них;

первичный измерительный прибор — дифманометр.

В случае необходимости передачи показаний на значительное расстояние к этим элементам добавляются:

вторичный преобразователь перемещения подвижного элемента дифманометра в электрический или пневматический сигнал;

вторичная линия связи — электрические провода или соединительные трубки;

вторичный измерительный прибор.

Помимо перечисленных частей в измерительный комплекс расходомера могут входить еще:

средства измерения плотности вещества (плотномеры или приборы измерения давления и температуры);

вычислительные устройства для учета в формуле расхода сигналов по p , ρ и t .

Расходомеры переменного перепада давления имеют следующие разновидности, в зависимости от вида преобразователя расхода:

- 1) с сужающими устройствами;
- 2) с гидравлическим сопротивлением;
- 3) центробежные;
- 4) с напорными устройствами;
- 5) с напорными усилителями;
- 6) ударно-струйные.

1. Расходомеры с сужающими устройствами СУ основаны на измерении перепада давления, возникающего в результате преобразования в СУ части потенциальной энергии в кинетическую. Разновидности СУ показаны на рис. 1, *a—m*; стандартные диафрагмы — на рис. 1, *a* и *б*; стандартные сопла — на рис. 1, *в*; сегментная диафрагма — на рис. 1, *г*; эксцентричная диафрагма — на рис. 1, *д*; кольцевая диафрагма — на рис. 1, *е*. Далее на рис. 1, *ж-н* показаны СУ для малых чисел Рейнольдса: двойная на рис. 1, *ж*; с входным конусом на рис. 1, *з*; с двойным конусом на рис. 1, *и*; сопло полукруга на рис. 1, *к*; сопло четверть круга на рис. 1, *л*; комбинированное сопло на рис. 1, *м*; цилиндрическое сопло на рис. 1, *к*. На рис. 1, *о* показана диафрагма с переменной площадью отверстия для автокомпенсации влияния изменения давления и температуры. Сопло Вентури показано на рис. 1, *п*, труба Вентури — на рис. 1, *р*, труба Далла — на рис. 1, *с* и двойное сопло Вентури — на рис. 1, *т*. Расходомеры с СУ имеют широчайшее применение для измерения расхода жидкости, газа и пара.

2. Расходомеры с гидравлическим сопротивлением основаны на измерении перепада давления, создаваемого этим сопротивлением. Режим потока в нем стремятся создать ламинарным, с тем чтобы перепад давления был пропорциональным расходу. Применяются редко, преимущественно для измерения малых расходов. В качестве преобразователя могут служить капиллярная трубка (реометр) или пакет таких трубок,

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

показанный на рис. 1, у. Другой тип преобразователя для больших расходов с шариковой набивкой (рис. 1, ϕ).

3. Центробежные расходомеры основаны на зависимости расхода от перепада давления, образующегося в закругленном элементе трубки под действием центробежных

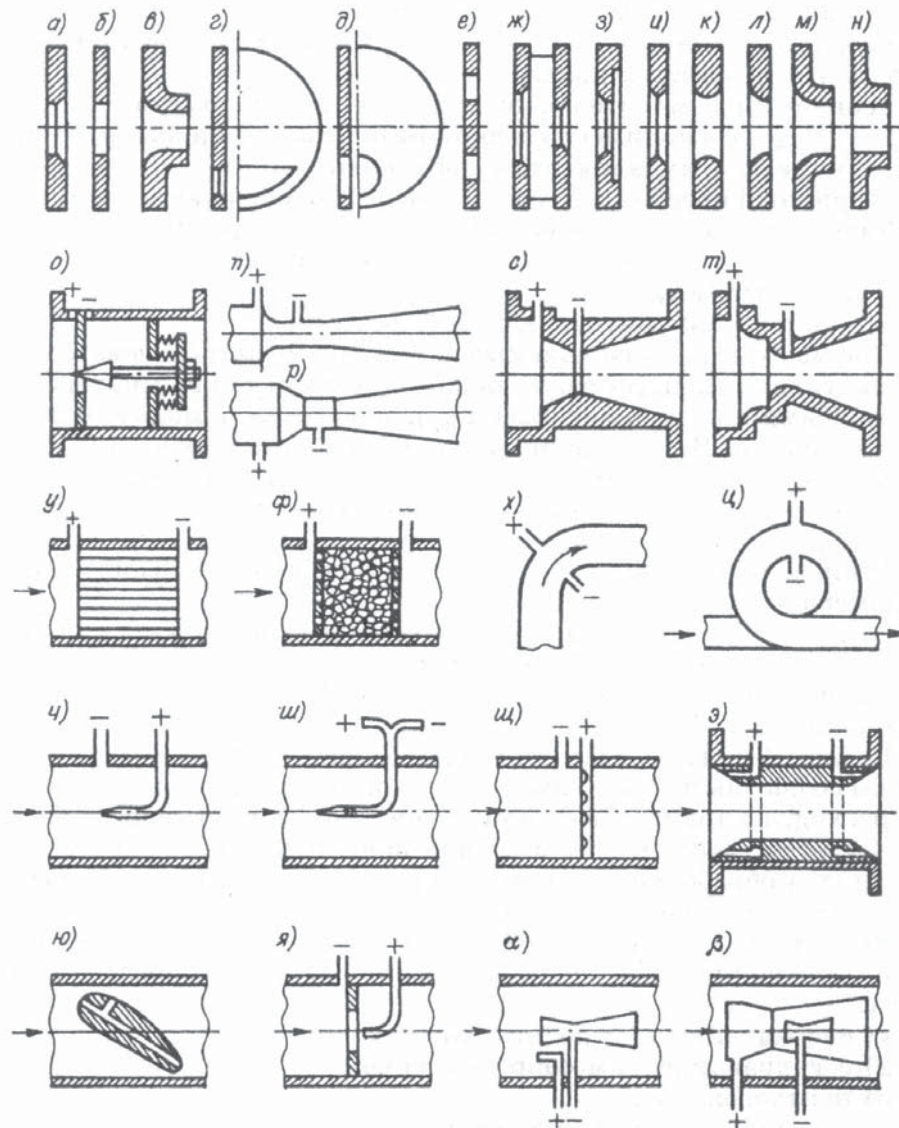


Рис. 1. Первичные преобразователи расходомеров переменного перепада давления.

сил в потоке. Преобразователем расхода чаще всего служат колесо (рис. 1, х) или резе кольцевой участок трубы (рис. 1, ц).

4. Расходомеры с напорным устройством основаны на возникающем в нем перепаде давления в зависимости от расхода в результате перехода кинетической энергии части потока в потенциальную. Классический преобразователь этого расходомера — трубка Пито для отбора полного напора в сочетании с трубкой для отбора статического давления. На рис. 1, ч показаны эти трубки в раздельном исполнении, а на рис. 1, ш — в комбинированном — дифференциальная трубка Пито. Эти преобразователи создают перепад давления в зависимости от местной скорости. Наряду с ними предложены преобразователи с осредняющими напорными трубками по диаметру (рис. 1, щ) или по радиусу, а при сильно деформированных потоках — по двум диаметрам. Кроме того, предложены кольцевая вставка (рис. 1, э) для усреднения давления по кольцевой площади и напорное поворотное крыло (рис. 1, ю) с двумя отверстиями, ориентированными различным образом к потоку. Возможность изменения угла установки крыла (обычно в

пределах 45-90°) позволяет применять его при разных скоростях потока. За исключением двух последних примеров напорные устройства находят широкое применение.

5. Расходомеры с напорным усилителем имеют преобразователь расхода, в котором сочетаются напорное и сужающее устройства. Перепад давления создается в результате как местного перехода кинетической энергии потока, так и частичного перехода потенциальной энергии в кинетическую. На рис. 1, а показана комбинация диафрагмы с трубкой Пито. На рис. 1, б — сочетание трубки Пито с трубкой Вентури, а на рис. 1, в — сдвоенная трубка Вентури. Напорные усилители применяют при небольших скоростях газовых потоков, когда перепад давления, создаваемый одной дифференциальной трубкой Пито, очень мал.

6. Расходомеры ударно-струйные основаны на зависимости расхода от перепада давления, возникающего при ударе струи. Струя, вытекающая из суженных отверстий трубки, создает давление p_1 во внутренней полости сильфона, снаружи которого имеется меньшее давление p_2 , равное давлению уходящей жидкости. Эти приборы применяют лишь для измерения малых расходов жидкости и газа.

2. Зависимость между расходом и перепадом давления на сужающем устройстве

Выведем формулу расхода для самого распространенного СУ — стандартной диафрагмы, представляющей собой тонкий диск с центральным круглым отверстием диаметром d , имеющим острую входную кромку. Диафрагма установлена строго concentрично оси трубопровода, имеющего диаметр D . Обозначим через $A-A$ (рис. 2) сечение, от которого начинается сужение потока, а штриховой линией — границы потока, обусловленного проходом через отверстие диафрагмы. По инерции наибольшего сужения поток достигает в сечении $B-B$, отстоящем от диафрагмы на расстоянии $(0,3 - 0,8)D$, в зависимости от отношения $\beta = d/D$. Затем поток начинает расширяться и вновь достигает стенок трубопровода в сечении $C-C$. На рис. 2 показано изменение скорости и давления в пределах сечений $A-A$ и $C-C$. Для жидкости, плотность которой $\rho = \text{const}$ и не зависит от давления, скорости обратно пропорциональны площадям потока, при этом максимальная скорость v_b , достигается в сечении $B-B$, а скорость $v_c = v_a$. Статическое давление p_a до сечения $A-A$ у стенки трубы и в потоке одно и то же.

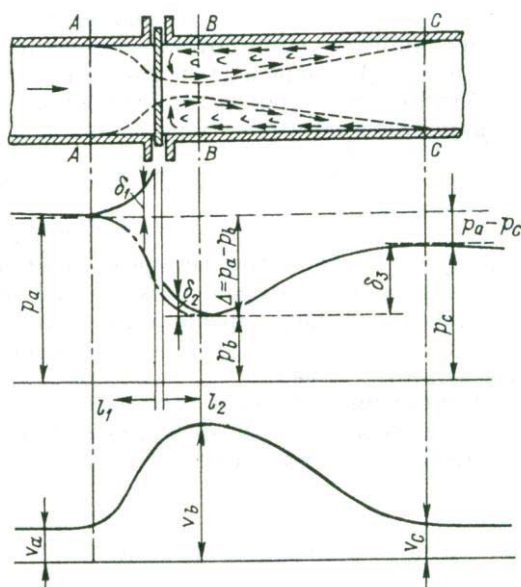


Рис. 2. Измерение давления p и средней скорости U потока при прохождении через диафрагму:

—— измерение p у стенки трубы;

— — — измерение p в движущемся потоке (в середине трубы).

| | | | | |
|------|------|----------|-------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
| | | | | |

НГТУ – 070500 – (М08 – АЭ – 2) – Р

Лист

13

По мере сужения потока между сечениями $A—A$ и $B—B$ давление в потоке падает (штриховая кривая), так как без этого невозможно возрастание скорости потока. Давление же у стенки возрастает (сплошная кривая) вследствие падения скорости в мертвых зонах перед диафрагмой, достигая максимума p_{1y} в углах у стенки последней. После диафрагмы давление в углах у стенки p_{2y} . Разность $\Delta p = p_{1y} - p_{2y}$ образует перепад давления, измеряемый при угловом методе отбора. На участке от $B—B$ до $C—C$ давление в потоке и у стенки постепенно возрастает до значения p_c , которое много меньше, чем начальное давление p_a вследствие потерь энергии на вихреобразование и удары о диафрагму, причем основная часть потерь происходит в мертвой зоне после диафрагмы. Поток, протекающий с очень большой скоростью в сечении $B—B$, увлекает за собой прилегающие частицы из мертвой зоны, создавая в ней некоторое падение давления. Это вызывает частичное движение жидкости вдоль стенок от сечения $C—C$ к сечению $B—B$. В результате в мертвой зоне возникает сильное вихреобразование и происходит значительная потеря давления. Она составляет от 40 до 90 % от перепада $(p_a - p_c)$, в то время как потеря давления от трения и ударов в самой диафрагме составляет не более 2 % от $(p_a - p_b)$. Решая уравнение, выражающее закон сохранения энергии,

$$\int v dv = \int dp / \rho \quad (1)$$

совместно с уравнением неразрывности потока

$$q_m = \rho \cdot q_0 = \rho v F = \text{const}, \quad (2)$$

где q_m и q_0 — массовый и объемный расходы, а F — площадь поперечного сечения потока, можно получить зависимость между q_m (или q_0) и перепадами давления $(p_1 - p_2)$ или $(p_a - p_b)$.

Считая трубопровод горизонтальным и $\rho = \text{const}$, предыдущие уравнения принимают вид:

$$p_a / \rho + k_a v_a^2 / 2 = p_b / \rho + k_b v_b^2 / 2 + \xi v_b^2 / 2; \quad (3)$$

$$q_m = \rho v_a F_a = \rho v_b F_b \quad (4)$$

где k_a и k_b — поправочные множители на неравномерность распределения скорости в сечениях $A—A$ и $B—B$ соответственно; ξ — коэффициент сопротивления на участке от $A—A$ до $B—B$, отнесенный к скорости v_b ; F_a и F_b — площади потока в сечениях $A—A$ и $B—B$ соответственно.

Отношение площади горловины потока F_b к площади отверстия диафрагмы F_0 называется коэффициентом сужения потока μ . Это позволяет выразить F_b через μ и F_0 по уравнению

$$F_b = \mu F_0. \quad (5)$$

Тогда из уравнения (4) получим, что

$$v_a = v_b \mu (F_0 / F_b) = v_b \mu (d / D)^2 = v_b \mu m,$$

где $m = \beta^2 = (d / D)^2$ — относительная площадь сужающего устройства.

Подставляя это значение v_a в уравнение (3) и решая его относительно v_b , получим

$$v_b = \sqrt{\frac{\psi}{\xi + k_b - k_a \mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}. \quad (6)$$

Коэффициент отбора $\psi = (p_a - p_b) / (p_1 - p_2)$ в этом уравнении учитывает, что в общем случае точки отбора давлений p_1 и p_2 могут не совпадать с сечениями $A—A$ и $B—B$. Так, у нас и в большинстве европейских стран применяют угловой метод отбора давлений p_{1y} и p_{2y} в углах, образованных входной и выходной плоскостями диафрагмы со стенками трубы. При этом $(p_1 - p_2) = (p_{1y} - p_{2y})$. Если отбор производят в сечениях $A—A$ и $B—B$, то коэффициент $\psi = 1$.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

Подставляя значения F_b и v_b , из уравнений (5) и (6) в уравнение (2), получим:

$$q_m = \alpha F_0 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} \quad (7)$$

$$q_0 = \alpha F_0 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)/\rho} \quad (8)$$

где

$$\alpha = \mu \sqrt{\psi} / \sqrt{\xi + k_b - k_a \mu^2 m^2} \quad (9)$$

называется коэффициентом расхода диафрагмы, где $m = \beta^2$.

Формулы (7) и (8) справедливы для жидкостей. Для газа и пара их надо умножить на коэффициент расширения ε , учитывающий увеличение удельного объема (уменьшение плотности ρ) газа и пара. С учетом ε получаем универсальные формулы для q_m (кг/с) и q_0 (м³/с) (в общем виде справа по ГОСТ 8.563-97):

$$q_m = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} = C E \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2\rho \Delta p} \quad (10)$$

$$q_0 = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} = C E \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (11)$$

При $\varepsilon = 1$ из них как частный случай получаем уравнения (7) и (8). Очевидно, площадь отверстия СУ $F_0 = \pi d^2/4$.

В международном стандарте ИСО 5167 коэффициент расхода для всех СУ представлен в виде двух сомножителей по формуле

$$\alpha = EC, \quad (12)$$

где $E = 1/\sqrt{1 - \beta^4}$ — коэффициент скорости схода; C — коэффициент истечения.

Причем всегда $E \geq 1$, а $C \leq 1$, $\beta = d/D$.

Описание принципа действия СУ, положенное в основу стандарта ИСО 5167, ориентировано лишь на те СУ, у которых нет дополнительного сужения потока после выхода через отверстие СУ, т. е. у которых $\mu = 1$. В ИСО 5167 нет никакого упоминания о μ , а тем более разъяснения его физического смысла. Таким образом, рассмотрение принципа действия диафрагмы отсутствует в ИСО 5167, одновременно отсутствует и какой-либо анализ коэффициента истечения C , который разъяснял бы, почему для сопел, а также сопел и труб Вентури C лежит в пределах 0,9 - 0,995, а для диафрагм $C \approx 0,6$. А ответ состоит в том, что для всех СУ коэффициент C учитывает потерю энергии в самом СУ, неравномерность распределения скоростей по сечению и месторасположение отбора давлений, т. е. в формуле (9) учитываются коэффициентами ξ , k_a , k_b и ψ , а для диафрагмы коэффициент C учитывает еще и коэффициент сужения $\mu = 0,6 - 0,69$.

Упрощенное выражение (9) коэффициента расхода α можно объяснить и оправдать лишь тем, что определить конкретные значения теоретически с достаточной точностью по формуле (9) нельзя. С большой точностью значения коэффициентов C и α определяются экспериментально. Но ценность формулы (9) состоит в том, что ее анализ позволяет выявить влияние на коэффициент расхода α всех входящих в нее величин: β , μ , ξ , k_a , k_b и ψ .

3. Анализ формулы расхода

Из полученных формул расхода следует, что между ним и измеряемым перепадом давления $\Delta p = p_1 - p_2$ существует квадратичная зависимость. В простейшем виде эти формулы можно выразить так:

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

$$q_m = r' \sqrt{\Delta p}; \quad q_0 = r'' \sqrt{\Delta p}, \quad (13); (14)$$

где $\kappa' = \alpha F_0 \sqrt{2\rho}$; $\kappa'' = \alpha F_0 \sqrt{2/\rho}$.

При градуировке расходомерных шкал дифманометров принимают $\kappa' = \text{const}$ и $\kappa'' = \text{const}$. А это требует постоянства всех величин: α , ε , F_0 и ρ , определяющих значения κ' и κ'' . К сожалению, это требование не выполняется.

Не существует СУ, которое обеспечивало бы постоянство α (С) для данного $\beta = d/D$ при любых расходах (или, точнее, в любой области чисел Рейнольдса Re), потому что на α могут оказывать влияние вязкость $\mu(\nu)$, плотность ρ , скорость ν (а значит, и расход q) измеряемого вещества, а также диаметр D (или, точнее, отношение d/D). Число Рейнольдса Re — это безразмерная величина, являющаяся отношением сил инерции потока к силам вязкостного трения в нем,

$$Re = \nu \rho D / \mu = \nu D / \nu, \quad (15)$$

где μ — динамическая, а ν — кинематическая вязкость вещества, причем $\nu = \mu / \rho$.

Учитывая, что $\nu = 4q_0 / (\pi D^2)$ и $q_m = q_0 \rho$, получим:

$$Re = 0,354 q_m / (D\mu) = 0,354 q_m / (D\rho\nu); \quad (16)$$

$$Re = 0,354 q_0 / (D\mu) = 0,354 q_0 / (D\nu), \quad (17)$$

где μ в $H \cdot c / m^2$, ν в m^2 / c , ρ в $кг / m^3$, q_m в $кг / ч$, q_0 в $m^3 / ч$, D в м. Если же измерять μ в $кгс \cdot c / m^2$, то:

$$Re = 0,0361 q_m / (D\mu); \quad (18)$$

$$Re = 0,0361 q_0 \rho / (D\mu). \quad (19)$$

Из этих формул следует, что число Re пропорционально расходу.

При больших числах Рейнольдса ($Re > 10^5 - 10^6$) коэффициенты С и α сохраняют очень хорошее постоянство, особенно у таких СУ, как диафрагма, сопло, сопло Вентури и труба Вентури, особенно первые два. Для малых же чисел Re , вплоть до $Re = 40$, разработаны другие типы СУ.

Значение коэффициента расширения ε непрерывно уменьшается от начала шкалы к q_{max} . Это надо учитывать как дополнительную погрешность, или же следует вносить поправку на изменение ε с помощью вычислительного устройства в зависимости от отношения $\Delta p / p$.

Площадь отверстия СУ сохраняется постоянной благодаря тому, что СУ изготавливается из материала, стойкого к коррозии и эрозии. Тем не менее притупление входных кромок диафрагмы неизбежно, и при малых $d < 125$ мм надо вводить поправку K_{Π} к С и α .

Гарантировать постоянство плотности ρ измеряемого вещества (особенно газа или пара) нельзя. Необходимо вводить поправочный множитель k_m (при q_m) и k_0 (при q_0):

$$k_m = \varepsilon \sqrt{\rho} / \varepsilon_{\Gamma} \sqrt{\rho_{\Gamma}} \approx \sqrt{\rho / \rho_{\Gamma}};$$

$$k_0 = \varepsilon \sqrt{\rho_{\Gamma}} / \varepsilon_{\Gamma} \sqrt{\rho} \approx \sqrt{\rho_{\Gamma} / \rho},$$

где ρ_{Γ} — плотность, принятая при градуировке; ρ — действительная плотность.

Действительную плотность газа ρ обычно определяют, измеряя его температуру T и давление p_l .

Для влажного газа

$$\rho = \rho_c (p_l - \varphi \cdot p_{в.н.}) T_c / (p_c T_l K) + \varphi \rho_{в.н.}, \quad (20)$$

где $\rho_c = 101\,325$ Па (760 мм рт. ст.) и $T_c = 293,15$ К — нормальные давление и температура; ρ — плотность сухой части газа при p_c и T_c ; K — коэффициент сжимаемости газа; φ — относительная влажность газа; $p_{в.н.}$ — максимально возможное парциальное давление водяного пара при T_l ; $\rho_{в.н.}$ — наибольшая возможная плотность пара при p_l и T_l .

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

Для сухого газа

$$\rho = \rho_0 p_1 T_c / (p_c T_1 K). \quad (21)$$

4. Стандартные диафрагмы и сопла

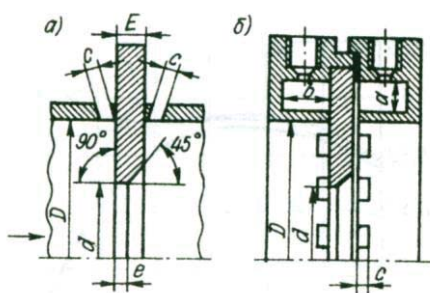


Рис. 3. Стандартная диафрагма: а – с точечным угловым отбором p_1 и p_2 ; б – с камерным угловым отбором p_1 и p_2

Международный стандарт ИСО 5167 [54] регламентирует применение трех разновидностей стандартной диафрагмы, различающихся лишь местом отбора давлений p_1 и p_2 . При угловом способе отбор давлений осуществляется непосредственно у входной и выходной плоскостей диска диафрагмы. При фланцевом методе отбор производится на расстояниях 25,4 мм (1") от этих плоскостей, а при радиальном (трехрадиусном) методе отбор давления p_1 происходит на расстоянии $l_1 = 0,9-1,1 D$ от входной плоскости, а давления p_2 — на расстоянии $l_2 = 0,5 D$ (где D — внутренний диаметр трубопровода) от выходной плоскости диска диафрагмы. Основной метод отбора — угловой. На рис. 3 представлены стандартные диафрагмы с угловым отбором. Они представляют собой диск с круглым отверстием диаметром d в центре. Входной угол отверстия должен быть острым или равным 90° , без каких-либо дефектов, а ширина цилиндрического отверстия e должна быть в пределах от $0,005D$ до $0,02D$, где D — внутренний диаметр трубопровода. При угловом методе возможны два варианта отбора давлений: точечный (рис. 3, а) с помощью двух отверстий, просверленных во фланце трубопровода, и камерный (рис. 3, б). В последнем случае диск диафрагмы зажимается между двумя кольцевыми обоймами, в которых проточены прямоугольные кольцевые камеры. В камеру давления p_1 и p_2 поступают через кольцевые щели толщиной s и через отдельные отверстия, расположенные на внутренней поверхности каждой из обойм, имеющей диаметр D_K , удовлетворяющий неравенству $D \leq D_K \leq 1,0 D$, где D — внутренний диаметр трубопровода. Из кольцевых камер производится отбор усредненных давлений p_1 и p_2 . Конструкция камерной диафрагмы целесообразна при давлениях до 10 МПа. Для давлений до 20 МПа имеются конструкции фланцев, в которых вытачиваются усредняющие камеры, сообщающиеся через пазы с пространствами до и после дисковой диафрагмы, зажимаемой между фланцами. При еще более высоких давлениях применяют линзовые уплотнения.

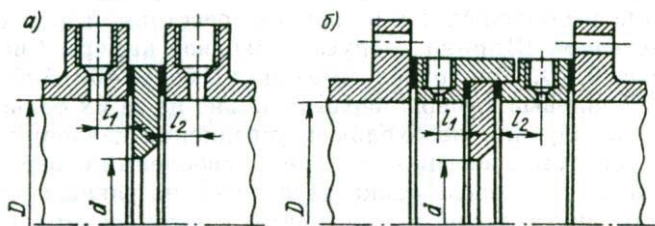


Рис. 4. Диафрагмы с фланцевым отбором давления: а — во фланцах; б — в обойме

Диафрагма с фланцевым отбором давлений показана на рис. 4. Номинальные расстояния осей отверстий отбора давления l_1 и l_2 после диафрагмы равны 25,4 мм. Диаметры отверстий для отбора давлений должны быть не более $0,13D$ и не более 13 мм. Минимальный диаметр отверстий определяется вероятностью засорения и обеспечением

удовлетворительных динамических характеристик. Кромки отверстий должны быть заподлицо с внутренней поверхностью трубопровода.

У диафрагмы с радиальным (трехрадиусным) отбором давлений номинальное расстояние l_1 от диафрагмы до оси отверстия для отбора давления p_1 равно $1D$, но может находиться в пределах от $0,9D$ до $1,1D$.

Достоинства фланцевого и особенно трехрадиусного методов заключаются в большей пологости кривых давлений в местах отбора по сравнению с угловым методом и

отсутствии в связи с этим необходимости применения малых диаметров отверстий для отбора давлений.

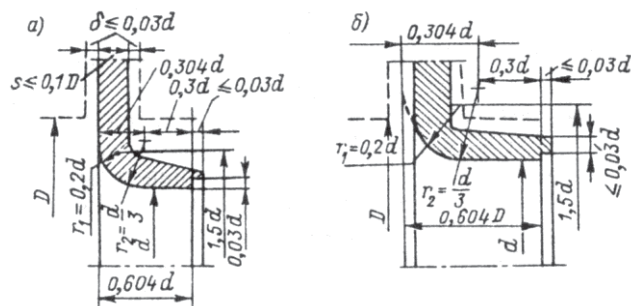


Рис. 5. Стандартное сопло: а — при $m \leq 0,444$;
б — при $m > 0,444$

Профиль стандартного сопла ИСА 1932 по ГОСТ 8563-97 и ИСО 51679 показан на рис. 5. Сопло состоит из плавно сужающейся входной части, образованной дугами двух радиусов $r_1 = d/5$ и $r_2 = d/3$, и цилиндрической части на выходе длиной $l = 0,3d$. Общая длина сопла равна $0,6041d$. Кроме того, для предохранения выходной кромки сопла, которая должна быть острой (без заусенцев, фасок или

вмятин), служит защитный кольцевой выступ, имеющий длину не более $0,03d$ и внутреннюю расточку диаметром $1,06d$. При $d/D < 2/3$ дуга радиусом $r_1 = d/5$ по касательной сопрягается с входной плоскостью сопла (рис. 5, а), образуя входную торцевую плоскость сопла. При $d/D = 2/3$ ширина этой плоскости внутри трубопровода равна нулю, а при $d/D > 2/3$ точка сопряжения выходит за пределы внутреннего диаметра трубы, что вынуждает плоскую часть сопла делать усеченной (рис. 5, б), а общую длину сопла меньше, чем $0,6041d$.

Центр окружности радиусом r_1 находится на расстоянии $0,2d$ от входного торца (неусеченного) и на расстоянии $0,75d$ от оси сопла. Центр окружности радиусом r_2 ($12 + \sqrt{39}$) $d/60 = 0,3041d$ от входного торца (неусеченного) и на расстоянии $5d$ от оси сопла. Толщина фланца сопла S не более $0,1D$. Горловина сопла длиной $0,3d$ должна быть цилиндрической. Результаты измерения диаметра d в любом сечении цилиндрической части не должны отличаться от среднего значения более чем на $0,5\%$. Среднее значение d определяют в результате измерения не менее чем четырех диаметров, равноотстоящих друг от друга. Значения любых двух диаметров сужающейся входной части сопла, измеренные в одной плоскости, перпендикулярной к оси сопла, не должны различаться более чем на $0,1\%$ от их среднего значения. Для отбора давления p_1 перед соплом применяют только угловой метод отбора, а для отбора давления p_2 после сопла наряду с угловым разрешается отбор давления p_2 на небольшом расстоянии l_2 от входного торца сопла, которое должно быть не более $0,2D$ при $\beta > 0,67$ и не более $0,1D$ при $\beta < 0,67$. При этом диаметры отверстий для отбора должны быть не более $0,13D$ и 13 мм. При угловом же методе отбора справедливы все указания, сделанные выше для диафрагм, и в том числе рекомендация по применению камерного отбора, способствующего усреднению давлений p_1 и p_2 .

По сравнению со стандартными диафрагмами сопла имеют следующие преимущества. Благодаря отсутствию входной острой кромки сопла значительно лучше сохраняют постоянство коэффициентов истечения C и расхода α , иными словами, обладают хорошей износоустойчивостью. Шероховатость трубопровода влияет на значение исходных коэффициентов C и α у сопел меньше, чем у диафрагм. То и другое делает особенно целесообразным применение сопел для труб небольших диаметров: $D = 50-200$ мм. Кроме того, потеря давления у сопел несколько меньше, чем у диафрагм, а коэффициент сужения $\mu = 1$, благодаря чему коэффициенты C и α больше, чем у диафрагм. Поэтому при одном и том же предельном перепаде дифманометра сопла измеряют на 70% большие расходы, чем диафрагмы. Погрешность исходного значения коэффициента истечения δ_C у сопел на $0,2-0,3\%$ выше, чем у диафрагм. Это компенсируется меньшей погрешностью коэффициента расширения δ_ϵ . Но диафрагмы имеют более широкую сферу применения, особенно в области больших чисел Re . Кроме того, значения коэффициентов C и α экспериментально определены для диафрагм у труб, имеющих D от 50 до 1000 мм, а у сопел — лишь до 500

мм. Из этого сравнения вытекает, что в очень многих случаях в трубопроводах диаметром, не превосходящим 500 мм, и для чисел Рейнольдса, не превосходящих 10, сопла имеют определенные преимущества перед диафрагмами.

5. Трубы Вентури

Наряду с рассмотренными диафрагмами и соплами к стандартным сужающим устройствам международный стандарт ИСО 5167, а также отечественные нормы относят так называемые расходомерные трубы: классические трубы Вентури и сопла Вентури. Характерный их признак — расходящийся конус—диффузор, расположенный на выходе после наименьшего сечения горловины трубы. Диффузор отрезает мертвые зоны, имеющиеся на выходе у диафрагм и сопел, в которых вследствие вихреобразования происходит потеря энергии, особенно большая при малых β . Поэтому у расходомерных труб потеря давления во много раз меньше, чем у других сужающих устройств. Это их основное преимущество.

Труба Вентури была предложена в США еще в конце XIX в. Гершелем. Она состоит (рис. 6): из входной цилиндрической части, имеющей диаметр D , который может отличаться от диаметра трубопровода не более чем на $0,01D$, и длину $L = D$; конуса (конфузора), сходящегося под углом $21 \pm 1^\circ$, длиной $2,7(D - d)$; цилиндрической горловины, имеющей диаметр и длину, равную d , и диффузора, расходящегося под углом $\varphi = 7-15^\circ$.

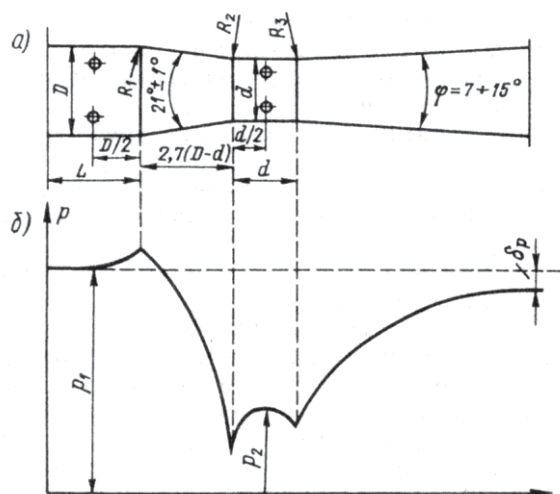


Рис. 6. Труба Вентури: а — схема и основные размеры; б — изменение давления у стенки трубы

и в плоскости отверстий для отбора давления p_2 .

Расстояние оси отверстия для отбора давления p_2 от любого конца горловины должно быть $0,5d \pm 0,02d$. Площадь поперечного сечения полости кольцевых камер для отбора давлений p_1 и p_2 должна быть не менее половины общей площади отверстий для отбора давлений, но эти площади следует увеличить в два раза, если перед трубой Вентури расположен короткий прямолинейный участок (минимально допустимый) трубопровода. Значение параметра шероховатости R_a горловины и прилежащих радиусов сопряжения должно быть не более $10^{-5}d$.

Допускается делать выходной диаметр диффузора меньше диаметра трубопровода D . Такие трубы Вентури называются укороченными. При этом разрешается уменьшать длину диффузора не более чем на 0,35 %.

Имеются три разновидности классических труб Вентури, обусловленные способом изготовления внутренней поверхности входного конуса (конфузора) и профиля пересечения его с горловиной.

Число отверстий для отбора давлений как p_1 , так и p_2 должно быть не менее четырех и располагаться равномерно, а их оси должны быть перпендикулярны к оси трубы Вентури. Диаметры отверстий должны быть в пределах от 4 до 10 мм, но не более $0,1D$ для давления p_1 и не более $0,13d$ для давления p_2 . Минимальное число измерения диаметров D и d должно быть равно числу отверстий для отбора давлений D и d . Отклонение отдельного изменения диаметра D от среднего должно быть не более чем на 0,4%, а диаметра d от среднего не более чем на 0,2%. В горловине диаметры надо измерять в трех сечениях: в начале и в конце горловины

1. Обработанные трубы Вентури. Применяют для трубопроводов небольших диаметров D — от 50 до 250 мм. Изготавливаются литьем. Входной конус, горловину и входную цилиндрическую часть обрабатывают. Переходы между коническими и цилиндрическими элементами выполняют с закруглениями и без них.

2. Литые трубы: Вентури. Применяют для трубопроводов средних диаметров — от 100 до 800 мм. Изготавливаются литьем в песочную форму или другим способом. Обрабатывают только горловину сопла, а места перехода между коническими и цилиндрическими сегментами закругляют.

3. Сварные трубы Вентури с входным коническим, конусом из листовой стали. Применяют для трубопроводов больших диаметров — от 200 до 1200 мм. Обычно изготавливаются сваркой. В трубах, малого диаметра горловину обрабатывают.

Трубы Вентури имеют следующие достоинства:

1. Очень малая потеря давления δ_p (рис. 6).
2. Возможность установки на трубопроводах, не имеющих длинных прямых участков.
3. Отсутствие влияния шероховатости трубопровода на коэффициент истечения.
4. Возможность измерения загрязненных сред.
5. Простота расчета вследствие независимости коэффициента истечения C от β .
6. Возможность очень длительной многолетней работы благодаря хорошей износостойчивости.

6. Сопла Вентури

В международном стандарте ИСО 5167 и отечественных нормах ГОСТ 8.563-97 имеется еще и сопло Вентури, которое, как и труба Вентури, благодаря выходному диффузору имеет очень малую потерю давления.

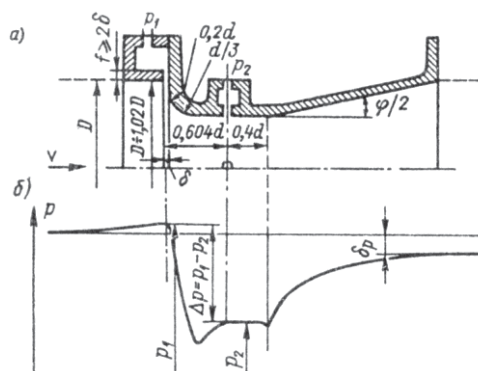


Рис. 7. Сопло Вентури: а – схема и основные размеры; б – изменение давления

Сопло Вентури состоит (рис. 7) из плавно сужающейся входной части, цилиндрической горловины и выходного диффузора. Входная часть вместе с начальным участком горловины длиной $0,3d$ представляет собой стандартное сопло. К нему добавляется второй участок горловины длиной от $0,4d$ до $0,45d$. Таким образом, общая длина горловины будет от $0,7d$ до $0,75d$. К выходному концу горловины без радиусного сопряжения присоединяется диффузор, угол конусности которого разрешается делать вплоть до 30° .

Наиболее целесообразны углы $12-16^\circ$. При меньших углах не только увеличивается длина сопла, но и возрастает потеря давления. При больших углах возможны отрыв потока от стенок, возникновение неустойчивого движения и, как следствие, пульсации измеряемого перепада давления.

Отбор давления p_1 осуществляется так же, как и у стандартного сопла ИСА 1932. При этом рекомендуется применять на входе кольцевую камеру для обеспечения среднего значения p_1 . Отбор давления производят из горловины на расстоянии $0,3d$ от ее начального входа через не менее чем четыре отверстия, расположенных равномерно по окружности горловины. Диаметры этих отверстий должны быть не более $0,04d$ и лежать в пределах от 2 мм до 10 мм с учетом предотвращения их засорения. Эти отверстия соединяются с наружной кольцевой камерой или трубкой.

7. Двойная диафрагма

Двойная диафрагма — одно из первых сужающих устройств, предложенное и исследованное Вельцхольцем в 1936 г. Это устройство состоит (рис. 8) из двух стандартных дисковых диафрагм, расположенных на расстоянии $a = (0,3-0,5)D$ друг от друга. Давление p_1 отбирается у передней плоскости первой вспомогательной диафрагмы, имеющей диаметр отверстия d_1 , а давление p_2 — у задней плоскости второй основной диафрагмы, диаметр отверстия которой d . Диаметр d_1 всегда больше, чем d . Двойная диафрагма по своим свойствам — промежуточная между стандартной диафрагмой и стандартным соплом, так как вспомогательная диафрагма при правильно выбранном

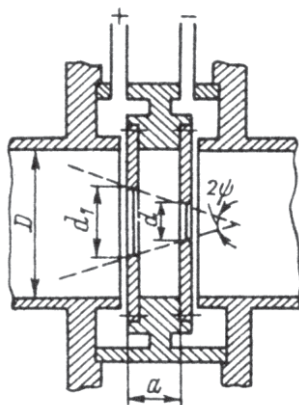


Рис. 8. Двойная диафрагма

расстоянии облегчает вход потока в отверстие основной диафрагмы. В связи с этим потеря давления в ней меньше, чем у стандартной диафрагмы, но больше, чем у стандартного сопла, а значение коэффициента расхода α меньше, чем у сопла, но больше, чем у диафрагмы.

8. Диафрагма с двойным конусом

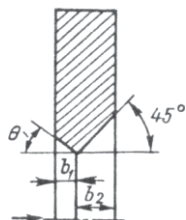


Рис. 9. Диафрагма с двойным конусом

Приведенная на рис. 9, диафрагма имеет конический вход с углом конуса θ и конический выход с углом 45° . Характеристика такой диафрагмы в значительной степени зависит от угла θ и ширины входной части b_1 . Было выполнено много исследований до установления оптимальных значений θ и b_1 . В одной из первых работ исследовали диафрагмы с θ от 15 до 30° и с $b_1 = 0,5d$, а в дальнейшем — диафрагмы с $\theta = 50^\circ$ и с $b_1 = 0,06d$. Но в работах не было подтверждено постоянство α в области малых и средних чисел Re у этих диафрагм. Наилучшие результаты были получены для диафрагм, имевших $\theta = 40^\circ$, $b_1 = 0,06d$ и $b_2 = 0,3d$.

9. Диафрагма с коническим входом

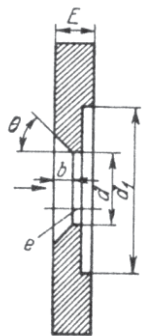
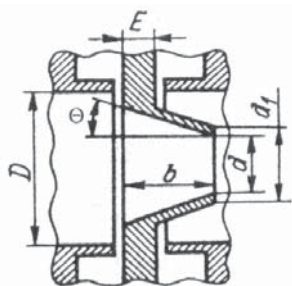


Рис. 10. Диафрагма с коническим входом

Угол входного конуса у диафрагм (рис. 10) в зависимости от отношения d/D изменяется в пределах от $31,2$ до 45° , а ширина конуса b — в пределах от $0,083$ до $0,175$. За входным конусом расположено цилиндрическое отверстие диаметром d и шириной $e = 0,021d \pm 0,0025d$. Толщина диафрагмы $E \leq 0,1D$. Со стороны выхода у диафрагмы имеется цилиндрическая выточка. Ее диаметр $d_1 \geq 2d$. Допустимые значения отношения d/D находятся в пределах от $0,1$ до $0,5$. Диафрагма с входным конусом давно была разработана и исследована английской фирмой «Кент», но ее характеристики опубликованы сравнительно недавно.

10. Конусная диафрагма



Конусная диафрагма, предложенная и исследованная Куратовым, состоит (рис. 11) из конической части длиной b с углом входа θ . Были исследованы диафрагмы с углами θ , равными 15° и 25° , и отношениями b/d от 0,3 до 1. Наилучшие результаты получены при угле $\theta = 15^\circ$ и отношении $b/d = 1$.

Рис. 11. Конусная диафрагма Куратова:
 $\theta = 15^\circ$; $b = d$; $d_1 = d + 4$ мм; $E \leq 0,1D$

11. Сопло четверть круга

Сопло четверть круга — одно из наиболее исследованных сужающих устройств, предназначенных для малых чисел Re . Возможные четыре разновидности этого сопла показаны на рис. 12.

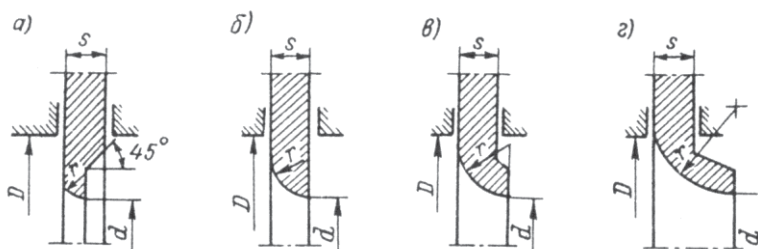


Рис. 12. Сопло четверть круга: а — $r < s$; б — $s = r$; в — $r > s$; г — $r > (D - d)/2$

Профиль сопла образуется дугой радиуса r . Во всех случаях, когда центр радиуса r находится в пределах диаметра трубы (рис. 12, а—в), профиль сопла равен четвертой части окружности, соединяющейся по касательной с торцевой плоскостью сопла. При больших градуировочных коэффициентах m , когда $r > (D - d)/2$, профиль сопла очерчен дугой, которая образует угол с торцевой плоскостью сопла (рис. 12, г).

Постоянство коэффициента расхода α обусловливается правильным выбором радиуса r . Оказывается, что при увеличении m от 0,05 до 0,48 радиус r должен значительно возрастать. При этом отношение r/d увеличивается от 0,1 до 0,446. В связи с этим при малых m радиус r оказывается меньше толщины сопла s , которая обычно равна $0,1D$ (рис. 12, а). С увеличением m радиус r становится равным s (рис. 12, б), а затем (рис. 12, в) радиус r делается уже больше толщины сопла s .

12. Цилиндрическое сопло

Имеются два типа цилиндрических сопел: несимметричное (рис. 13, а) и симметричное (рис. 13, б).

Первое было предложено Кённеке вместе с соплом четверть круга и комбинированным соплом. В дальнейшем цилиндрические несимметричные сопла исследовали в США, Японии и Польше. Опыты на трубе с $D = 100$ мм хорошо подтвердили значения α , полученные Кённеке, а также высокие значения Re_{max} . Симметричные цилиндрические сопла предложил Кабза. Он исследовал их на трубах, имевших D , равный 40, 32, 25 и 15 мм при m в пределах от 0,09 до 0,64.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
| | | | | |

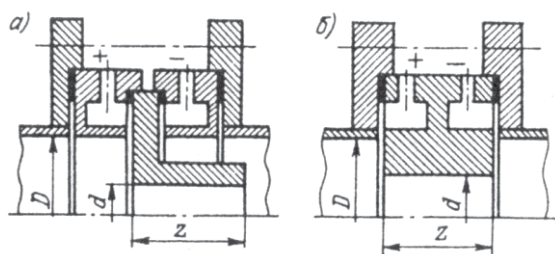


Рис. 13. Цилиндрические сопла:
а — несимметричное; б — симметричное

Значения α при $D = 40$ мм совпали с данными Кёнке. С уменьшением диаметра трубы было установлено увеличение α , незначительное при $D = 32$ и 25 мм, но существенное (на 3 – 4 %) при $D = 15$ мм. Достоинство цилиндрического сопла — простота изготовления, недостаток —

процессе эксплуатации притупления входной острой кромки, в результате которого коэффициент расхода α будет возрастать и одновременно, как показали опыты, будет возрастать и значение Re_{min} .

13. Комбинированное сопло

Комбинированное сопло, профиль которого показан на рис. 14, является сочетанием сопла четверть круга на входе и цилиндрической части, имеющей длину z на выходе. Зависимость z от d и от m приведена на рис. 15.

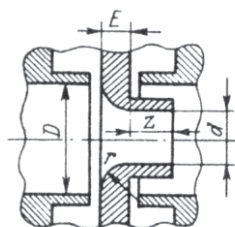


Рис. 14. Комбинированное сопло (профиль)

Комбинированное сопло предложено Кёнке в виде дополнения к соплу четверть круга и предназначено только для больших m от 0,45 до 0,75. Радиус r возрастает от $0,043d$ при $m = 0,45$ до $0,15d$ при $m = 0,58$, а затем уменьшается до $0,078d$ при $m = 0,75$ по закону $r = 0,5(D - d)$. Область постоянства по Кёнке находится в пределах чисел Re от $3 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^5$. Профиль комбинированного сопла имеет сходство с профилем стандартного сопла, но входная часть очерчена не двумя, а одним небольшим радиусом, а цилиндрическая часть значительно длиннее. Значения α у него немного меньше, чем у стандартного сопла.

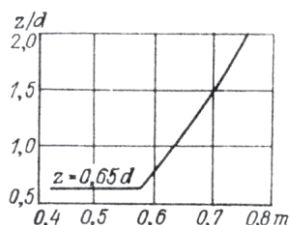


Рис. 15. Зависимость длины z/d от m

14. Осредняющая напорная трубка

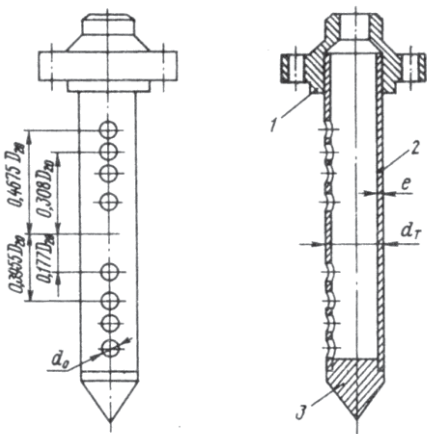


Рис 16. Осредняющая напорная трубка:
1 — фланец; 2 — осредняющая трубка;
3 — заглушка

На рис. 16 показана осредняющая трубка, разработанная в Одесском политехническом институте. При этом отбор статического давления в трубопроводе производится через отдельное отверстие, расположенное перед ОНТ на расстоянии $0,075D \pm 0,025D$ под углом $\beta = 15-165^\circ$ к ней. Это обеспечивает весьма близкое к единице значение коэффициента расхода α (преобразования) ОНТ. По данным ВНИИР, для трубок ОПИ он лежит в пределах 0,9915-0,9955. Его погрешность $\delta_\alpha = 1,2\%$ в пределах чисел Рейнольдса Re от $1,8 \cdot 10^5$ до 10^8 .

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
| | | | | |

Работами ОПИ установлено, что коэффициент α сохраняет наибольшую стабильность, если площадь внутреннего поперечного сечения ОНТ не меньше 80 % от площади всех отверстий на лобовой стороне трубки. Отсюда следует уравнение для определения наибольшего допустимого числа n этих отверстий:

$$n = 0,8d_B^2 / d_0^2,$$

где d_B — внутренний диаметр трубки; d_0 — диаметр каждого отверстия.

Так как толщина стенки трубки $\delta = 0,1d_B$, то и наружный диаметр $d_H = 1,2d_B$, а минимальное значение d_H определяется из условия прочности трубки, и оно тем больше, чем больше внутренний диаметр трубопровода D и скорость v (точнее, qv^2). Для стальных трубок с пределом текучести материала $\sigma = 1,93 \cdot 10^8$ Па (сталь 1Х18Н9Т) ОПИ дает формулу для определения внутреннего диаметра осредняющей трубки d_T :

$$d_T = 4 \cdot 10^{-4} v D \sqrt{\frac{\rho}{[\sigma_T](1-\eta)^4}},$$

где $[\sigma_T]$ (Па); η (d_B/d_T).

Оба конца ОНТ укрепляются в стенке трубопровода, а в ее середине помещена пробка, через которую проходит импульсная трубка, имеющая наружный диаметр $d_H \leq 0,05d_B$ и два отверстия на своих концах для отбора давлений из каждой половины ОНТ.

Диаметр отверстий d_0 выбирают тем больше, чем больше d_T . В методике ВНИИР 1992 г. указано, что d_0 должно быть не больше 5 мм, а минимальный размер зависит от вероятности засорения и желаемых динамических характеристик.

Число отверстий n на лобовой стороне зависит от отношения $(d_B/d_0)^2$. В трубке ОПИ принято $n = 8$. Это требует, чтобы было $(d_B/d_0) > 10$. Центры отверстий располагаются на расстояниях $0,354D/2$, $0,616D/2$, $0,791D/2$ и $0,935D/2$ в обе стороны от середины трубки. По мере приближения к периферии расстояния между отверстиями уменьшаются, потому что они размещаются в середине равновеликих по площади кольцевых участков. При очень сильно деформированных полях скоростей, что может быть при очень малых прямых участках трубопроводов, ОПИ предложил и исследовал применение двух ОНТ, расположенных перпендикулярно друг к другу и имеющих импульсные трубки, соединенные друг с другом. Эта комбинация трубок получила название «осредняющий крест».

Осредняющие кресты изготавливались в ОПИ для очень больших диаметров D труб, идущих от насосов, в частности для очень больших D , равных 0,585, 0,645, 1,01, 1,28, 1,675 и 2,2 мм, и при этом диаметры трубок d , образующих крест, находились в пределах 25-85 мм.

Определение расхода с помощью осредняющей напорной трубки.

Исходная формула объемного расхода q_0 (м³/ч) имеет вид

$$q_0 = 0,05252 \alpha \varepsilon D^2 \sqrt{\Delta p / \rho},$$

где α — коэффициент расхода, для трубок ОПИ $\alpha = 0,9915 - 0,9955$ (в среднем $\alpha = 0,9935$); ε — множитель, учитывающий расширение газа; D — диаметр трубопровода, мм; Δp — перепад давления, кгс/м²; ρ — плотность вещества, кг/м³.

15. Соединительные трубки

Сужающее устройство (или другой преобразователь расходомера переменного перепада давления) соединяется с дифференциальным манометром двумя импульсными (соединительными) трубками.

В большинстве случаев диаметры трубок выбирают в пределах от 8 до 13 мм (чаще всего 10-12 мм). Меньшие диаметры нежелательны из-за опасности засорения трубок и

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

НГТУ – 070500 – (М08 – АЭ – 2) – Р

Лист

24

образования в них воздушных пузырей или водяных пробок. С увеличением же диаметров возрастает расход материала и проводка становится громоздкой, а при измерении расхода газа происходит и запаздывание показаний. Но с увеличением длины трубок, а также вязкости и загрязненности измеряемой среды ИСО рекомендует увеличивать диаметр трубок.

Длину соединительных трубок желательно выбирать возможно меньше. При этом возрастают надежность проводки и быстродействие расходомера. Так, ИСО рекомендуют иметь эту длину не более 16 м, но нет запрета на применение и более длинных трубок. Материал для изготовления трубок должен выдерживать давление измеряемого вещества, быть антикоррозийным и по возможности удобным для монтажа. В большинстве случаев применяют стальные трубки: водогазопроводные (газовые) и бесшовные (используются при относительно больших давлениях). Бесшовные могут быть изготовлены из углеродистой стали, а также из низколегированной и высоколегированной. Не допустимы горизонтальные участки у трубок. Последние должны иметь уклон не менее 1 : 10 или лучше 1 : 12 для того, чтобы конденсат и осадки могли удаляться в ловушки или отстойники, а пузырьки газа подниматься к газосборникам или уходить в трубопровод. Эти уклоны надо увеличивать при измерении расхода жидкостей более вязких, чем вода.

16. Устройства, применяемые при измерении расхода теплоносителя

Для измерения расхода пара:

При измерении расхода пара соединительные трубки заполнены конденсатом. При измерении расхода может нарушиться равенство конденсатных столбов в обеих трубках за счет перемещения части конденсата в дифманометр. Во избежание этого применяют уравнильные сосуды, имеющие большую площадь поперечного сечения. Они устанавливаются непосредственно у сужающего устройства.

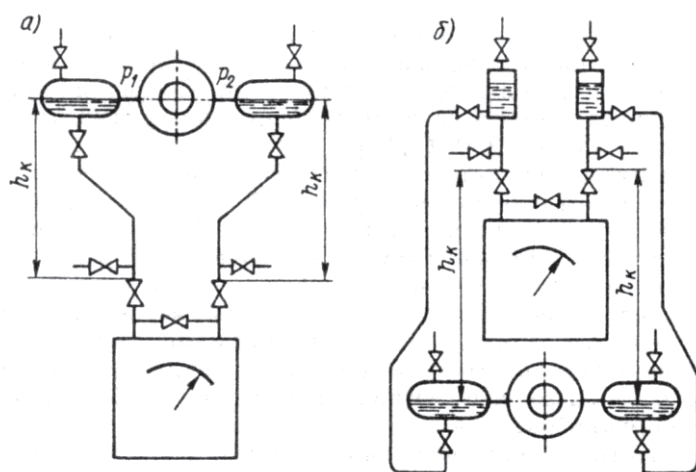


Рис. 17. Схемы расположения уравнильных сосудов и соединительных трубок при дифманометре, находящемся: а — ниже диафрагмы; б — выше диафрагмы

Дифманометр желательно располагать ниже сужающего устройства (рис. 17, а) с тем, чтобы воздух, выделившийся или случайно попавший в трубки, мог уйти в паропровод. При необходимости установки дифманометра выше сужающего устройства надо на самом верху поместить газосборники (рис. 17, б). При горизонтальном трубопроводе давления p_1 и p_2 отбирают по горизонтальному диаметру. При вертикальном и наклонном паропроводе трубку, идущую от нижнего отверстия

отбора, теплоизолируют, поднимают до плоскости верхнего отверстия и в одной плоскости вводят обе трубки в уравнильные сосуды. Последние бывают со стоком и без стока конденсата в паропровод. Преимущественно применяют первые. Их действие тем эффективнее, чем больше горизонтальная площадь f_c зеркала в сосуде и чем меньше измерительный объем V_u дифманометра, т. е. тот объем, который перемещается из одного колена в другое при изменении перепада от 0 до Δp_{max} .

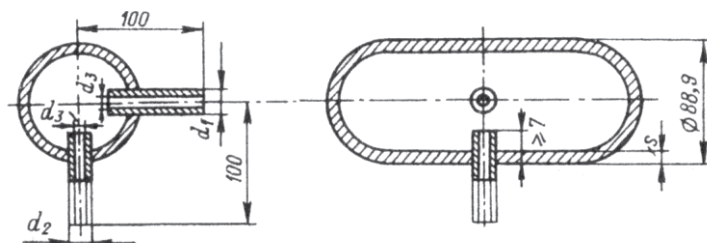


Рис. 18. Уравнительные сосуды, рекомендуемые ИСО

Форма уравнительных сосудов, рекомендуемая ИСО, показана на рис. 18. Малый сосуд имеет длину $L = 100$ мм и вместимость 170-250 см³, большой — длину $L = 230$ мм и вместимость 600-800 см³. Толщина стенки s составляет 5, 7, 1 и 12,5 мм

при испытательном давлении 19 и 54 МПа. Диаметры d_1 и d_2 находятся в пределах от 12,7 до 24 мм в зависимости от давления и способов соединения концов трубки. Диаметр $d_3 = (8 - 8,7)$ мм.

При очень высокой температуре пара для предохранения сужающего устройства от попадания холодной жидкости из трубок ИСО рекомендует непосредственно перед сужающим устройством располагать ловушку типа кармана, объем которого примерно равен объему уравнительного сосуда.

Для измерения расхода воды и неагрессивных жидкостей

При измерении расхода жидкостей дифманометр желательно устанавливать ниже сужающего устройства, чтобы воздух, выделившийся в соединительных трубках, мог уйти в трубопровод. Если необходимо установить дифманометр выше сужающего устройства, то еще выше дифманометра надо поместить сборники воздуха, а соединительные трубки, присоединяемые к сужающему устройству при горизонтальном трубопроводе в плоскости горизонтального диаметра или немного ниже, надо сперва опустить вниз на 100-200 мм и лишь затем вести их кверху. Диаметр сборников воздуха 25-60 мм, высота равна четырем диаметрам. В случае загрязнения измеряемой жидкости надо несколько ниже сужающего устройства поместить отстойные камеры.

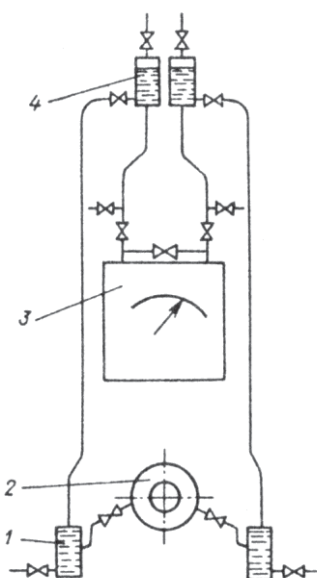


Рис. 19. Схема соединений при измерении расхода воды в дифманометре, находящемся выше диафрагмы:

1 — отстойные камеры; 2 — сужающее устройство;
3 — дифманометр; 4 — воздухосборник

На рис. 19 показана схема с отстойными камерами и сборниками воздуха при дифманометре, установленном выше сужающего устройства. В случае опасности замерзания воды в соединительных трубках применяют электрический или паровой обогрев. Но при этом надо обеспечить равномерность нагрева обеих трубок и избежать испарения воды в трубках. Если температура жидкости в трубопроводе более 120 °С, то для обеспечения равенства плотностей жидкости в обеих соединительных трубках следует установить уравнительные сосуды (как и при измерении расхода пара).

17. Дифференциальные манометры

Общая характеристика дифференциальных манометров

Дифференциальные манометры (или сокращенно дифманометры) измеряют перепад давления, создаваемый сужающим устройством или другим преобразователем расхода. Они различаются по принципу действия, пределам измерений и характеру отсчетного устройства (показывающие, самопишущие, интегрирующие и т. п.). Кроме того, многие дифманометры оборудуются электрическими или пневматическими преобразователями перемещения чувствительного элемента прибора в сигнал, поступающий на вторичный измерительный прибор. При этом дифманометр может иметь или не иметь отсчетное устройство (т. е. быть бесшкальным). В последнем случае они представляют собой двухступенчатые преобразователи перепада давления.

По принципу действия дифманометры могут быть жидкостными или деформационными.

Существуют следующие разновидности жидкостных дифманометров: с неподвижными коленами, с одним подвижным коленом, с двумя подвижными коленами и колокольные.

У всех дифманометров жидкостной системы измеряемый перепад давления ($p_1 - p_2$) уравнивается разностью давлений, создаваемых столбом манометрической жидкости высотой h в минусовом колене и столбом вещества такой же высоты, находящемся в плюсовом колене над манометрической жидкостью. Но только у дифманометров с неподвижными коленами эта высота служит для измерения перепада $p_1 - p_2$ который у других дифманометров измеряется по высоте перемещения колокола или подвижного колена либо по углу поворота кольца прибора.

Дифманометры с неподвижными коленами подразделяют на приборы с видимым уровнем, с электрическим съемом положения уровня и на поплавковые дифманометры.

Деформационные дифманометры подразделяют на мембранные и сильфонные. В них перепад давления уравнивается силами упругости мембраны или сильфона либо дополнительной (обычно винтовой) пружины (одной или несколькими) и измеряется по перемещению чувствительного элемента.

Все перечисленные разновидности жидкостных и деформационных дифманометров могут быть компенсационными.

Жидкостные дифманометры обладают высокой точностью и надежностью действия, но они инерционны, и во многих из них в качестве манометрической жидкости применяется ртуть; при этом требуется соблюдение особых правил техники безопасности, что осложняет эксплуатацию этих дифманометров.

Деформационные дифманометры малоинерционны, и для них не требуется ртуть, но их показания зависят от степени совершенства упругих свойств мембран или сильфонов, а при недостаточной надежности предохранительных устройств возможно их повреждение при перегрузке. Отмеченные недостатки долго сдерживали распространение деформационных дифманометров. Теперь эти недостатки в значительной степени преодолены, и эти приборы стали широко применяться, вытеснив в большинстве случаев производственной практики жидкостные дифманометры в области средних и больших перепадов давления. Но и в области малых перепадов давления они могут конкурировать с колокольными и кольцевыми дифманометрами жидкостной системы. Кроме того, жидкостные приборы широко применяют в качестве образцовых и контрольных.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

Примеры дифференциальных манометров

а) Жидкостные дифманометры с видимым уровнем

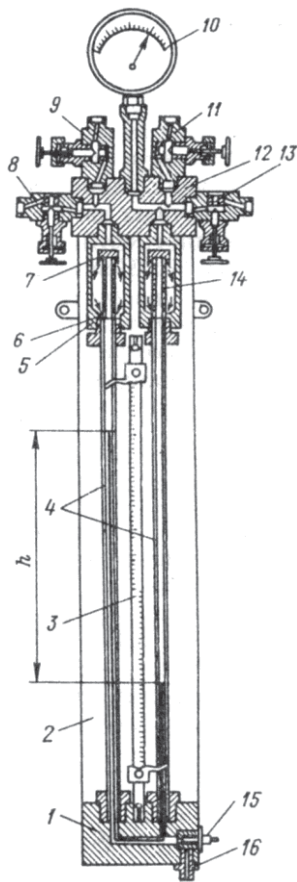


Рис. 20. Двухтрубный дифманометр

Эти дифманометры состоят из двух трубок или сосудов, сообщающихся между собой и заполненных манометрической жидкостью до нулевой отметки шкалы. Высоту столба манометрической жидкости, а также высоту подъема одного из сосудов в приборах компенсационного типа измеряют визуально. В некоторых случаях (в многотрубных дифманометрах) осуществляют последовательное соединение нескольких трубок. В основном применяют дифманометры с одной манометрической жидкостью, подразделяющиеся на U-образные (основные приборы) и П-образные, но для измерения малых перепадов давления существуют приборы и с двумя манометрическими жидкостями.

Имеется большое разнообразие приборов, работающих на принципе U-образной трубки, в том числе двухтрубные, многотрубные, однострунные с наклонной трубкой и компенсационные дифманометры.

Простейший представитель жидкостных дифманометров с видимым уровнем — это стеклянная или металлическая U-образная трубка, заполненная до середины манометрической жидкостью и снабженная шкалой. Подобный дифманометр получил название двухтрубного. (Для использования на ядерных энергетических установках, трубки дифманометров выполняют не из стекла, а из металла или другого материала.) Конструкция его показана на рис. 20. На доске 2 укреплены стальной блок 1 с внутренним каналом, шкала 3 (длиной 700-800 мм) и верхний блок 12.

С помощью накладных гаек и резиновых уплотнений две толстостенные стеклянные трубки 4 закрепляются внизу в блоке 1 и вверху в ртутеулавливающих камерах 5, в которых находятся короткие металлические трубки 14, являющиеся продолжением трубок 4. При чрезмерном возрастании перепада давления ртуть выбрасывается в камеру 5, вытекает из отверстий 7, имеющихся у трубок 14, и через отверстия 6 вновь поступает в трубки 4. Вентили 8 и 13 служат для присоединения импульсных трубок, а вентили 9 и 11 для продувки. Манометр 10 измеряет давление p_1 . Заполнение ртутью и слив ее производится через ниппель 16, запираемый конусным клапаном 15.

Уравнение измерения дифманометра имеет вид

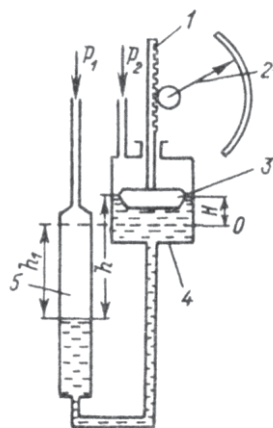
$$\Delta p = p_1 - p_2 = hg (\rho_1 - \rho_2),$$

где h — разность уровней манометрической жидкости в трубках; ρ_1 и ρ_2 — плотности манометрической жидкости и вещества, находящегося над ней.

б) Поплавковые дифманометры

Поплавковыми называются жидкостные дифманометры с неподвижными коленами, у которых измеряемый перепад давления уравнивается столбом манометрической жидкости, а измеряется перемещением поплавка, находящегося в одном из колен дифманометра (рис. 21).

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
|-----|------|----------|-------|------|



Обозначив через H ход поплавка, который равен перемещению уровня жидкости в поплавковом сосуде, через D и d — диаметры поплавкового и непоплавокососудов соответственно, получим уравнение измерения поплавкового дифманометра с цилиндрическими коленами:

$$p_1 - p_2 = Hg(\rho_1 - \rho_2)(1 + D^2/d^2).$$

Для перехода на другой предел измерения (при неизменном ходе поплавка H и диаметре D) меняют диаметр d . В связи с этим соответствующее колено или сосуд обычно называют сменным. Равенство переместившихся объемов дает уравнение для определения d .

Рис. 21. Схема поплавкового дифманометра с цилиндрическими коленами: 1 – механизм, передающий движение от поплавка 3 к стрелке прибора 2; 4 – минусовый поплавок; 5 – плюсовой сосуд.

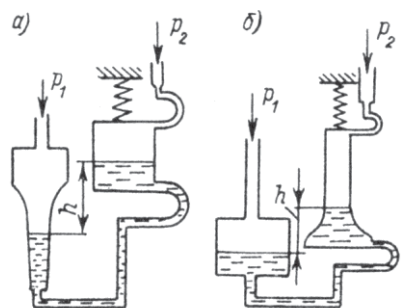
$$d = D\sqrt{H/(h-H)}.$$

Из этого уравнения следует, что чем больше h , т. е. чем больше предел измерения Δp_{\max} , тем меньше d . Отечественные поплавковые дифманометры при ртутном заполнении имеют семь сменных сосудов на Δp_{\max} , равный 6,3, 10, 16, 25, 40, 63 и 100 кПа. Предельные давления имеют значения 6,3, 25 и 40 МПа. Диаметр D поплавкового сосуда немного больше диаметра поплавка $D_n \approx 78$ мм, который должен быть достаточным для получения необходимой перестановочной силы. Ход поплавка в отечественных дифманометрах 30-35 мм. Значительно реже встречаются поплавковые дифманометры не с ртутным, а с масляным заполнением для измерения малых Δp_{\max} от 0,04 до 4 кПа, у которых диаметр поплавка $D_n \approx 160$ мм, а предельное давление составляет 0,25 МПа.

В течение многих лет основными выпускаемыми дифманометрами были именно поплавковые, отличающиеся надежностью в работе и стабильностью показаний.

в) Жидкостные дифманометры с одним подвижным коленом

У жидкостных дифманометров такого вида измеряют перемещение подвижного колена.



На рис. 22 показаны схемы дифманометров с одним подвижным коленом, которое обычно бывает минусовым. Оно подвешено на пружине и имеет гибкое соединение с плюсовым коленом и трубкой, подводящей к нему давление p_2 . Под влиянием разности давлений $p_1 - p_2$ часть манометрической жидкости перетекает из неподвижного плюсового сосуда в минусовый, вызывая его перемещение, которое измеряется по шкале.

Рис. 22. Схемы дифманометров с подвижным коленом: а — плюсовым неподвижным; б — минусовым подвижным

Подвижной сосуд может быть цилиндрическим (рис. 22, а) или профилированным (рис. 22, б), обеспечивающим пропорциональность между расходом и перемещением подвижного сосуда. Уравнение измерения для первого из них имеет вид

$$p_1 - p_2 = H[c(f_n + f_n)/f_n f_n - g(\rho_1 - \rho_2)],$$

где c — коэффициент жесткости пружины; f_n и f_n — площади сечений подвижного и неподвижного сосудов соответственно.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
|-----|------|----------|-------|------|

Из этого уравнения следует, что перемещение H сосуда прямо пропорционально перепаду $p_1 - p_2$. В зависимости от жесткости пружины перемещение H может быть как меньше, так и больше разности уровней манометрической жидкости h . Если $c > 2a$, то $H < h$, если $c = 2a$, то $H = h$ и если $a < c < 2a$, то $H > h$. Здесь $a = g(\rho_1 - \rho_2)f_n f_n / (f_n + f_n)$. Во всех случаях необходимо, чтобы было $c > a$, так как при $c = a$ ход $H = \infty$.

2) Кольцевые дифманометры

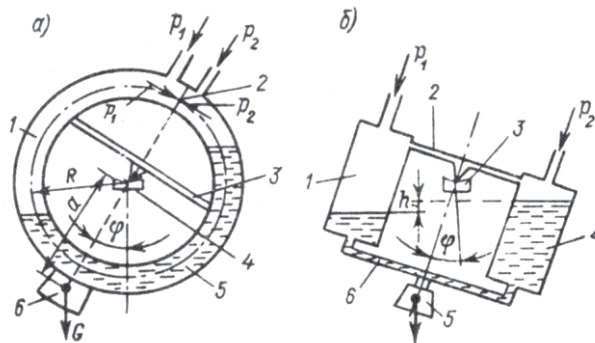


Рис. 23. Поворотные дифманометры:
а — кольцевой формы; б — некольцевой формы

Две схемы рассматриваемых приборов приведены на рис. 23. В большинстве случаев применяют кольцевые дифманометры (рис. 23, а), состоящие из полого кольца 1 с перегородкой 2 в верхней части, с разных сторон которой с помощью гибких трубок подаются давления p_1 и p_2 . Кольцо заполнено наполовину манометрической жидкостью 5 и снабжено поперечиной 3. При $p_1 > p_2$ кольцо поворачивается вокруг призматической опоры

4, установленной так, что ось вращения обычно совпадает с геометрическим центром кольца. Угол поворота φ зависит от веса груза 6, создающего противодействующий момент. На рис. 23, б показан поворотный дифманометр, состоящий из двух сосудов 1 и 4, соединенных трубкой 6 и укрепленных на поперечине 2. Он имеет груз 5, создающий противодействующий момент, и поворачивается вокруг призматической опоры 3 на угол φ , когда $p_1 > p_2$.

В кольцевом дифманометре (рис. 23, а) разность давлений $p_1 - p_2$, действующая на перегородку площадью f , создает вращающий момент M_6 в соответствии с уравнением

$$M_6 = (p_1 - p_2) f R,$$

где R — средний радиус кольца.

Под действием момента M_6 кольцо поворачивается по часовой стрелке на угол φ до тех пор, пока вес G груза, находящегося на расстоянии a от оси вращения, не образует противодействующий момент M_n , равный моменту M_6 . Очевидно, $M_n = G a \sin \varphi$.

Из равенства моментов M_6 и M_n следует, что

$$p_1 - p_2 = k \sin \varphi,$$

где $k = Ga/fR$.

В это уравнение не входит плотность манометрической жидкости. Следовательно, угол поворота φ не зависит от плотности жидкости, а значит, и от ее температуры. Другие существенные достоинства кольцевых дифманометров — легкость перехода на другой предел измерения путем смены противодействующего груза G и малое трение благодаря применению опоры ножевого типа. Но для этих дифманометров требуется повышенное внимание при эксплуатации и давления p_1 и p_2 должны подводиться к ним гибкими трубками.

Основная область их применения — измерение расхода доменного, коксового и других газов низкого давления при малых предельных перепадах: 250, 400, 630, 1000, 1600 Па. Здесь для подачи давлений p_1 и p_2 от импульсных трубок к дифманометру служат резиновые трубки. Манометрическая жидкость — масло или вода. Ранее изготавливали кольцевые дифманометры (на среднее до 3 МПа, а позднее на высокое до 70 МПа давления, что позволяет использовать их на источниках энергии) с тонкостенными спиральными

металлическими трубками для подвода давлений p_1 и p_2 и с ртутью в качестве манометрической жидкости. Для них в уравнении измерения должен учитываться момент M_m , создаваемый спиральными трубками при их закручивании, и момент M_k , образуемый дополнительными компенсирующими грузиками.

д) Колокольные дифманометры

Колокольный дифманометр состоит из одного колокола (реже двух, подвешенных на коромысле), частично погруженного в жидкость и перемещающегося под влиянием измеряемой разности давлений. Давление p_1 подается обычно внутрь колокола, а давление p_2 — снаружи, но встречается и обратная подача давлений. При двух колоколах давление p_1 подается под один колокол, а давление p_2 — под другой.

В зависимости от характера противодействующей силы колокольные дифманометры могут быть с гидравлическим, пружинным или с грузовым уравниванием.

Дифманометр с гидравлическим уравниванием показан на рис. 24, а. В нем уравнивание измеряемого перепада давления достигается за счет уменьшения гидростатического давления жидкости на колокол при его подъеме. Для этого дифманометр должен иметь толстые стенки, а иногда и плунжер посередине, чтобы обеспечить большую площадь поперечного сечения частей, погружаемых в жидкость. На рис. 24, а и б изображены дифманометры с цилиндрическими стенками с плунжером и без него. Для уменьшения количества заливаемой жидкости (ртути) иногда (рис. 24, в) в дне сосуда внутри колокола размещают вставку. На рис. 24, г показан двухжидкостной колокол, у которого тонкие стенки погружены в легкую жидкость (воду или масло), а цилиндрический плунжер — в тяжелую (ртуть). Для получения хода колокола, пропорционального расходу, профилируют необходимым образом стенки колокола (рис. 24, д) или его плунжер (рис. 24, е).

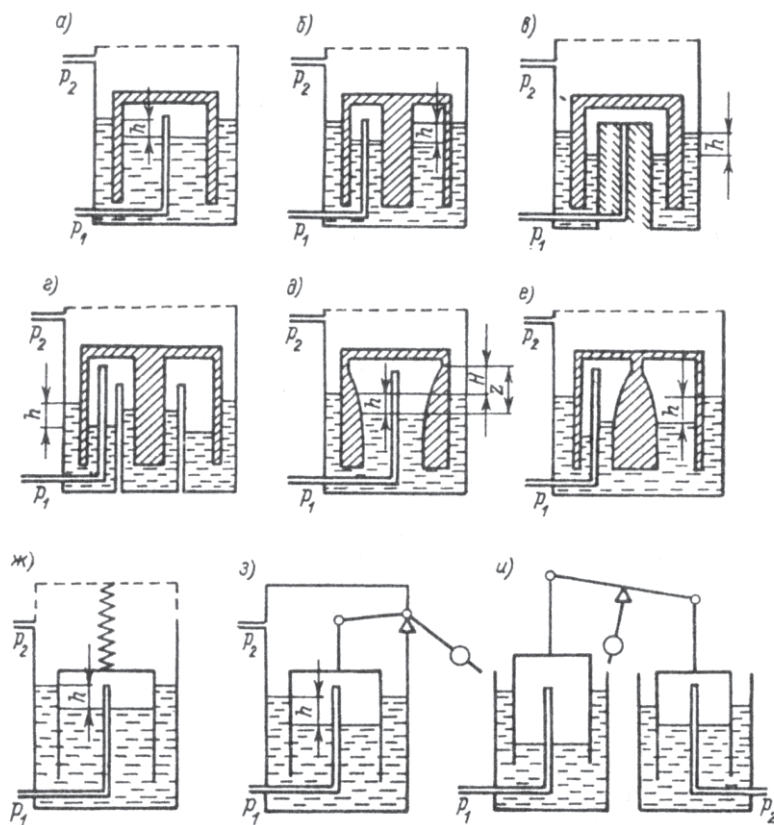


Рис. 24. Схемы колокольных дифманометров

В дифманометрах с пружинным уравниванием противодействующая сила создается за счет деформации пружины, которая приложена или к центру колокола (как показано на рис. 24, ж), или же к рычагу, на котором подвешен колокол.

В дифманометрах с грузовым уравниванием противодействующий момент создается грузом, воздействующим на рычаг, к которому подвешен один (рис. 24, з) или два колокола (рис. 24, и). У дифманометров с пружинным и грузовым уравниванием стенки колоколов тонкие и изменением гидростатического давления при перемещении колоколов здесь можно пренебречь.

Колокольные дифманометры отличаются высокой чувствительностью, которая тем выше, чем больше площадь дна колокола. Ход колокола может быть во много раз больше разности уровней жидкости снаружи и внутри колокола. Для сравнения у поплавковых дифманометров ход поплавка H всегда меньше разности уровней h манометрической жидкости в минусовом и плюсовом коленах. В связи с этим колокольные дифманометры применяют главным образом для измерения небольших перепадов давления (обычно в пределах 100-1000 Па), в частности для измерения расхода газа при незначительном избыточном давлении (0,06-0,25 МПа). Они весьма удобны также для измерения и регулирования давления в мартеновских, стеклоплавильных и других печах.

Рабочая жидкость в колокольном дифманометре не должна поглощать влагу из газа или иметь склонность к испарению. Целесообразно применение различных масел (особенно парафинистых).

е) Деформационные дифманометры

Деформационными называются дифманометры, у которых измеряемый перепад давления воспринимается чувствительным элементом (одна или несколько упругих или вялых мембран или сильфонов), уравнивается упругими силами либо самого элемента при его деформации, либо же дополнительными (чаще всего винтовыми) пружинами и измеряется по деформации этого элемента.

В качестве примера рассмотрим дифманометр с вялой мембраной.

Дифманометры с вялыми мембранами, не имеющими упругости, практически не оказывают влияние на точность измерения. Такие мембраны лишь воспринимают измеряемый перепад давления, а противодействующая сила создается дополнительной винтовой пружиной.

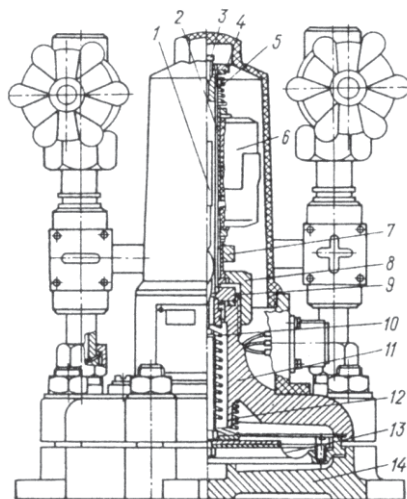


Рис. 25. Дифманометр ДМИ с вялой мембраной

На рис. 25 изображен бесшкальный дифманометр ДМИ, имеющий вялую резиноканевую мембрану 13 с жестким центром, подвешенным к пружине 10. Мембрана 13 зажата между днищем 14 и крышкой 1. Верхний конец пружины 10 с помощью держателя 9 и накидной гайки 8 крепится к крышке 11. Для стабилизации нулевого положения мембраны служит пружина 12. В центре мембраны укреплен шток с плунжером 1, перемещающимся внутри трубки 2 из немагнитной стали. Снаружи последней находятся обмотки дифференциально-трансформаторного преобразователя 6 типа ПД, который фиксируется пружиной 5 со специальной гайкой 4. Для корректировки нуля вторичного прибора

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

имеется опорная гайка 7, вращая которую можно перемещать преобразователь 6. Для выпуска воздуха трубка 2 имеет сверху отверстие, закрываемое пробкой 3. Дифманометр ДМИ работает в комплекте с вторичными приборами типов ВФП, ВФС, ВФПС, ВФСС. Питание первичных обмоток преобразователей дифманометра и вторичного прибора от разделительного трансформатора напряжением 24 В. Потребляемая мощность не более $50\text{В}\cdot\text{А}$. Приборы рассчитаны на статические давления 6,3 и 25 МПа и Δp_{max} от 0,63 кПа до 0,1 МПа. Приведенная погрешность комплекта по шкале вторичного прибора $\pm 1,5\%$. Основное назначение дифманометров ДМИ — измерение расхода газа, но они могут служить и для измерения расхода жидкостей.

Деформационные дифманометры появились позже жидкостных. Их распространение вначале сдерживалось несовершенством упругих свойств мембран и сильфонов и недостаточной надежностью устройств, предохраняющих их от перегрузки. Первый из этих недостатков сказывается на точности показаний прибора и проявляется в упругом гистерезисе, обуславливающем разницу в показаниях прибора при прямом и обратном ходах, и в упругом последствии — невозвращении в исходное положение после снятия нагрузки. Второй недостаток приводит к выходу из строя чувствительного элемента. Но после разработки так называемых дисперсионно-твердеющих сплавов с более совершенными упругими свойствами и изготовления из них мембран и сильфонов точность деформационных дифманометров существенно улучшилась. Наряду с этим были разработаны устройства, надежно предохраняющие мембраны и сильфоны от повреждения при перегрузке. Это обусловило широкое распространение деформационных дифманометров взамен жидкостных, которые в настоящее время в значительной степени оказались вытесненными в области средних и высоких перепадов давления.

Достоинства деформационных дифманометров: а) малая масса и, следовательно, малая инерция, обеспечивающая высокую частоту собственных колебаний; б) малое время запаздывания благодаря небольшому измерительному объему; в) отсутствие ртути; г) пригодность для работы на транспортных (в частности, судовых) установках; д) небольшие габаритные размеры, не зависящие от перепада давления.

жс) Компенсационные дифманометры

Компенсационными называются дифманометры, у которых перемещение чувствительного элемента воздействует на релейно-контактное или усилительное устройство, управляющее посторонним источником энергии; этот источник создает противодействующую силу, уравнивающую усилие от измеряемого перепада давления. В результате чувствительный элемент дифманометра во всем диапазоне измерения почти не меняет своего местоположения.

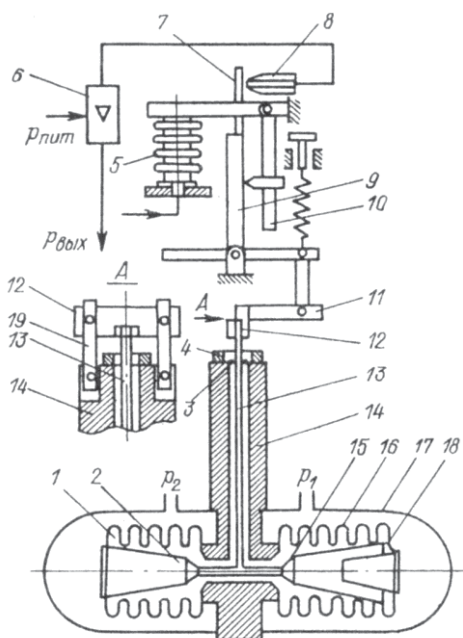
По роду уравнивающих сил различают дифманометры с компенсацией: пружинной, грузовой, пневматической и электрической.

По способу управления постоянным источником энергии компенсационные дифманометры разделяют на две группы. В первой из них контактно-релейное или усилительное устройство при переходе порога чувствительности включает двигатель, изменяющий противодействующую силу (натяг пружины, плечо груза) до тех пор, пока она не уравнивает усилие от перепада давления. При этом подвижная система в состоянии компенсации возвращается в исходное нулевое положение (в пределах зоны нечувствительности). В другой группе с помощью усилителя создается противодействующая сила, которая зависит от измерительного перемещения чувствительного элемента и связанной с ним подвижной системы прибора. Эта зависимость обычно пропорциональна Δp или $\sqrt{\Delta p}$. Следовательно, здесь чувствительный элемент и подвижная система в состоянии компенсации не возвращаются в исходное нулевое положение. Но у всех этих

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

Благодаря очень малому измерительному перемещению компенсационные дифманометры имеют много достоинств. Важнейшие из них — быстроедействие и существенное уменьшение влияния упругих свойств чувствительных элементов (мембран, сильфонов) на точность измерения. Кроме того, отпадает необходимость в сальниковом уплотнении выводного рычага, которое можно заменить гибким сильфоном или мембраной. Одновременно можно исключить трение в подшипниках, заменив их ленточными крестообразными подвесами. Все это благоприятно отражается на точности данных дифманометров, приведенная погрешность которых не превосходит $\pm(0,5 - 1) \%$. Дополнительные их достоинства — компактность конструкции, малая металлоемкость и легкость перехода на другой предел измерения путем изменения соотношения плеч рычагов, к которым приложены силы, уравнивающие друг друга. Но для этих приборов требуется высокое качество изготовления и они менее пригодны для работы в тяжелых условиях эксплуатации, в частности в условиях запыленной окружающей среды.

На рис. 26 изображена схема двухсильфонного компенсационного дифманометра типа ДС-П с пневматическим унифицированным преобразователем. На этом рисунке обозначено через: *1* и *16* — сильфоны, воспринимающие перепад давления; *2* и *15* — днища сильфонов; *3* — мембрана, уплотняющая выводной рычаг *13*; *4* — колодка, прижимающая мембрану *3* к основанию *14*; *5* — сильфон обратной связи; *6* — пневмоусилитель; *7* — заслонка; *8* — сопло; *9* — Т-образный рычаг; *10* — коленчатый рычаг; *11* — рычаг; *12* — траверса; *17* — корпус дифманометра; *18* — сильфон температурной компенсации; *19* — упругие ленты. Сильфонный блок дифманометра очень похож на изображенный на рис. 96, но в нем отсутствуют противодействующие пружины, а шток,



соединяющий днища сильфонов 2 и 15, с помощью приваренной к нему упругой стальной ленты соединен с выводным рычагом 13. Две стальные ленты 19, укрепленные на основании 14 и траверсе 12, с которой соединен рычаг 13, удерживают его от осевого перемещения при воздействии на мембрану 3 рабочего давления. Точно так же устроен и сильфонный блок компенсационного дифманометра ДС-Э с электрическим унифицированным преобразователем.

В зависимости от предельных перепадов давления имеется несколько модификаций двухсильфонных дифманометров: ДСП-3, ДС-ЭЗ и ДС-ЭРЗ (с квадратическим преобразователем) на пределы — 4, 6,3, 10, 16 и 25 кПа; ДСП-4, ДС-Э4 и ДС-ЭР4 на пределы — 25, 40, 63, 100 и 250 кПа и ДС-П5 и ДС-Э5 на пределы — 0,4 и 6,3 МПа. У дифманометров на предел 4 кПа класс точности 1 и 1,5, а у остальных — 0,6 и 1. Предельное избыточное давление 40 МПа.

Расходомеры постоянного перепада давления (ротаметры)

В простейшем виде ротаметр представляет собой коническую вертикальную трубку, внутри которой располагается поплавков. Обычно поплавок бывает с коническим бортиком.

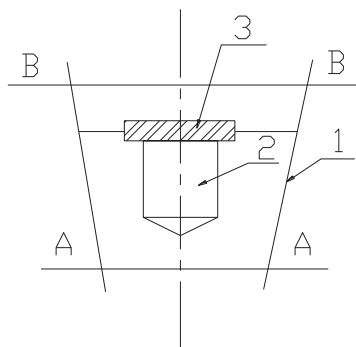


Рис. 27. Схема поплавкового ротаметра

Принципиальная схема поплавкового ротаметра представлена на рис. 27. Поплавок 2 находится в подвешенном состоянии в корпусе 1. Бортик у поплавка имеет канавки 3, обеспечивающие вращение поплавка вокруг оси, при этом он центрируется в потоке и устраняется его трение о стенки корпуса.

Между бортиком поплавка и стенкой трубки образуется кольцевой зазор с сечением f_k , при прохождении которого жидкость сужается, возникает разность между P_1 и P_2 (в самом узком сечении кольцевой струи).

Принцип действия ротаметра основан на уравнивании при любом расходе силы тяжести поплавка, силами, действующими на него со стороны потока.

$G = V\rho g$ - сила тяжести, действующая на поплавок

$$F = (P_1 - P_2) \cdot f,$$

где f – площадь поплавка

F – это сила, обусловленная разностью статических давлений в кольцевом зазоре.

$$W = \varphi(\rho v^2 / 2) \cdot f,$$

где φ – это коэффициент сопротивления поплавка, ρ - плотность, v - скорость среды, f – площадь сечения поплавка.

$$N = k v_k^n \cdot f_\sigma,$$

где k – шероховатость поплавка в зависимости от Рейнольдса, v_k - скорость потока в кольцевом зазоре, n - показатель степени, f_σ - площадь боковой поверхности.

$G_T = (P_1 - P_2)f + W + N$ - равнодействующая силы тяжести

$$P_1 - P_2 = \frac{(G - W - N)}{f}$$

Поскольку $W \ll G$ и $N \ll G$, тогда разность давлений $P_1 - P_2 = \frac{G}{f} \cdot (*)$

Т.е. перепад давления на поплавке оказывается независимым от расхода, поэтому он относится к группе расходомеров постоянного перепада давления.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
| | | | | |

НГТУ – 070500 – (М08 – АЭ – 2) – Р

Лист

35

При изменении расхода уравнение (*) начинает изменяться до тех пор, пока это равенство не установится.

$$Q = \alpha \cdot f_k \cdot \sqrt{\frac{2gV_{\Pi}(\rho_{\Pi} - \rho)}{\rho \cdot f}} \cdot f - \text{уравнение расхода для ротаметра.}$$

Недостатки:

1. Положение поплавка зависит не только от расхода но и от плотности среда.

$$K = \sqrt{\frac{\rho_{\text{сп}}(\rho_{\Pi} - \rho)}{\rho(\rho_{\Pi} - \rho_{\text{сп}})}} - \text{позволяет переходить на различные среды.}$$

Для измерения расхода сред под давлением используют металлические ротаметры с дистанционной передачей показаний.

2. Установка только на вертикальных участках.

Достоинство: измерение большого диапазона расхода.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

Расходомеры переменного уровня

1. Общая характеристика

Расходомерами переменного уровня называются приборы, основанные на зависимости между расходом и высотой уровня в сосуде, в который жидкость непрерывно поступает и из которого она вытекает через отверстие в дне или в боковой стенке. Преобразователь расхода в этих расходомерах — сосуд с отверстием истечения. Уровень в нем измеряется непосредственно или косвенным путем. Они применяются не только для измерения расхода жидкостей, вытекающих из трубопровода в открытые емкости, но и в емкости, находящиеся под давлением. В первом случае преобразователь расхода — открытый, во втором — закрытый.

Расходомеры могут быть с полностью или с частично затопленным отверстием истечения. У первых это отверстие делается круглым и располагается в дне или иногда внизу боковой стенки сосуда. Эта разновидность может рассматриваться как частный случай расходомеров переменного перепада давления. У вторых же, работающих по принципу водослива, отверстие истечения расположено в боковой стенке и имеет щелевую форму. Их обычно называют щелевыми расходомерами. У большинства расходомеров переменного уровня сосуд с отверстием истечения неподвижный, но он может быть и подвижным. В последнем случае измеряется вес сосуда, поскольку последний связан с высотой уровня, а значит, и с расходом жидкости.

Рассматриваемые расходомеры применяют преимущественно там, где применение расходомеров с сужающими устройствами затруднено по тем или другим причинам. Они служат для измерения расхода: агрессивных жидкостей, серы, сточных вод и загрязненных жидкостей, различных пульп, суспензий и газожидкостных, в частности нефтегазовых смесей.

2. Расходомеры с затопленным отверстием истечения

Затопленное отверстие истечения — круглое, обычно диафрагма. Стандартные же сопла не применяются в качестве отверстий истечения. У них возможен отрыв струи от стенки вследствие малых чисел Re_d и действия сил тяжести, нарушающих постоянство коэффициента расхода α .

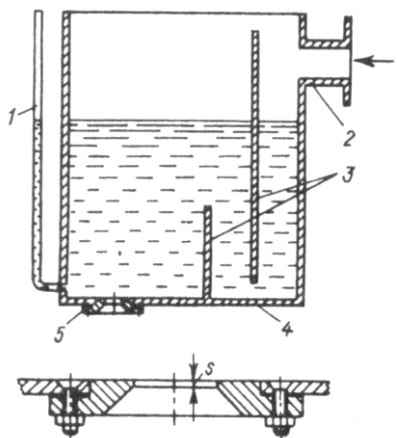


Рис. 28. Схема расходомера переменного уровня

Схема расходомера с диафрагмой 5, установленной в дне сосуда 4, изображена на рис. 28. Для устранения влияния динамического давления жидкости, поступающей в сосуд по трубе 2, на характер истечения ее из диафрагмы служат перегородки 3. Сосуд снабжен уровнемерной трубкой 1 со шкалой. Толщина s цилиндрической части диафрагмы в пределах от 0,5 до 0,8 мм (в зависимости от диаметра отверстия d). При этом отношение s/d находилось в пределах 0,094 – 0,173. Входные кромки у всех диафрагм имели угол 90° и остроту такую же, как и у стандартных диафрагм. Головки крепежных болтов утоплены в днище сосуда, а торцевая плоскость диафрагмы совпадает с плоскостью днища. Чтобы ближайшая боковая стенка не влияла на направление струй, притекающих к диафрагме,

расстояние от оси последней до боковой стенки должно быть не менее $3d$.

Перепад давления на диафрагме $\Delta p = h\rho g$, где ρ и h — плотность и высота уровня

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

НГТУ – 070500 – (М08 – АЭ – 2) – Р

Лист

37

жидкости в сосуде. Подставляя это значение Δp в уравнение $q_0 = \alpha F_0 \sqrt{2\Delta p / \rho}$, получим уравнение измерения для расходомера с сужающим устройством в дне сосуда

$$q_0 = \alpha F_0 \sqrt{2gh}$$

Отсюда следует, что объемный расход не зависит от плотности жидкости и целиком определяется высотой h . Зависимость q_0 от h квадратичная. Это же уравнение справедливо и для диафрагмы, установленной в боковой стенке, если h — высота уровня жидкости от оси отверстия диафрагмы.

Помимо диафрагм были исследованы сопла четверть круга диаметром 20 мм и радиусом закругления $r = 7$ мм, установленные в дне сосуда.

3. Щелевые расходомеры с неподвижным сосудом

Для измерения расхода воды в открытых каналах давно и широко применяют водосливы. Щелевой расходомер — миниатюрный водослив в стенке сосуда, в который непрерывно подается жидкость. Расход определяют по высоте уровня жидкости над нижней кромкой отверстия истечения. От формы этого отверстия зависит характер шкалы прибора.

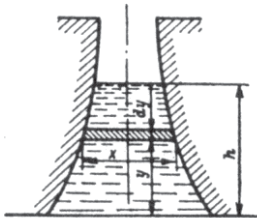


Рис 29. Отверстие истечения щелевого расходомера

На рис. 29 изображено отверстие истечения произвольной формы. Объемный расход dq_0 через элементарную площадку отверстия шириной x и высотой dy , находящуюся на высоте y от нижней кромки, находим из уравнения $dq_0 = axdy [2g(h-y)]^{0.5}$, где a — коэффициент расхода. Отсюда следует уравнение для полного расхода q_0 через отверстие истечения:

$$q_0 = \sqrt{2g} \int_0^h ax \sqrt{h-y} dy$$

Пример устройства щелевого расходомера для измерения расхода газонасыщенной нефти приведен на рис. 30.

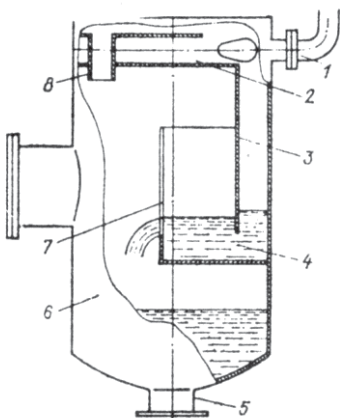


Рис 30. Схема щелевого расходомера для измерения расхода нефти

Нефть по трубе 1 поступает тангенциально в сепарационную камеру 2, где происходит разделение фаз. Жидкость опускается в сосуд 4, снабженный успокоительной перегородкой 3, и вытекает через щелевое отверстие 7 в нижнюю часть емкости 6. Газ же в сепарационной камере поднимается вверх и по трубе 8 переходит в нижнюю часть емкости 6, где вновь смешивается с нефтью и вместе с ней уходит по трубе 5. Измерение уровня в сосуде 4 можно выполнять различными способами. При гидростатическом методе один конец дифманометра присоединяется к нижней, а другой — к верхней части сосуда 4.

4. Щелевые расходомеры с подвижным сосудом

У щелевых расходомеров с подвижным сосудом, непрерывно заполняемым жидкостью, измеряется масса камеры, из которой жидкость вытекает через отверстие в дне или в боковой стенке. При надлежащей форме сосуда можно получить линейную зависимость между массой жидкости m в сосуде и расходом.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
|-----|------|----------|-------|------|

На рис. 30 показаны четыре разновидности подвижных сосудов. Три из них (рис. 31, а—в) имеют щелевые отверстия истечения в одной из боковых стенок. У одного (рис. 31, г) круглое отверстие истечения находится в дне. У всех сосудов две боковые стенки параллельны и расположены на расстоянии C_k друг от друга.

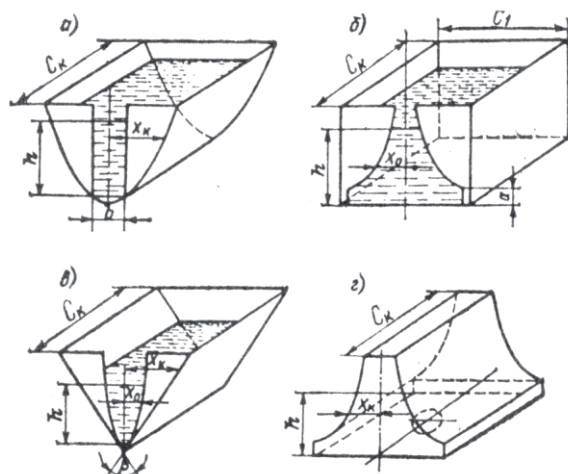


Рис. 31. Подвижные сосуды расходомеров переменного уровня

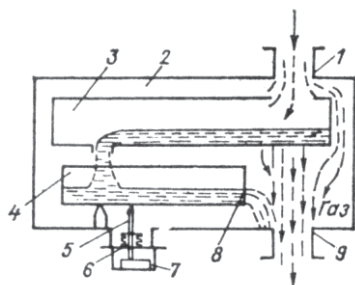


Рис. 32. Устройство расходомера с подвижным измерительным сосудом

Чтобы обеспечить пропорциональность между массовым расходом q_m и m в сосуде (рис. 31, а) с прямоугольным отверстием, надо две параллельные боковые стенки выполнить в виде параболических сегментов, у которых ширина $2x_k$ связана с высотой h зависимостью $x_k = 2p_ch$, где p_c — параметр параболы.

В качестве примера на рис. 31 показана схема щелевого расходомера с подвижным сосудом. В цилиндрическом корпусе 2 расположены сепарирующая емкость 3 сегментообразной формы и подвижной

измерительный сосуд 4 треугольной формы. Нефть в смеси с газом по трубе 1 поступает в сепаратор 3, в котором жидкость течет по широкому основанию, дегазируясь при этом. Затем через дозирующую щель, расположенную над осью опоры подвижного сосуда 4, она выливается в сосуд. Из сосуда 4 жидкость через отверстие истечения 8 параболической формы вытекает в нижнюю часть корпуса 2, где смешивается с газом и удаляется по трубе 9.

Вес сосуда 4 воздействует через стержень 5, имеющий сильфонное уплотнение 6, на тензорезисторный преобразователь 7 силоизмерительного устройства.

Тахометрические расходомеры

1. Общая характеристика

Тахометрическими называются расходомеры и счетчики, имеющие подвижной, обычно вращающийся элемент, скорость движения которого пропорциональна объемному расходу. Они подразделяются на турбинные, крыльчатые, шариковые, роторно-шаровые и камерные. Иногда крыльчатки называют турбинками, различаются они конструкцией лопаточного аппарата и подачей потока.

Измеряя скорость движения подвижного элемента, получаем расходомер, а измеряя общее число оборотов (или ходов) его — счетчик количества (объем или массу) прошедшего вещества. Счетчики воды и газа давно получили широкое распространение, так как для этого надо лишь соединить вал турбинки или другого преобразователя расхода через зубчатый редуктор со счетным механизмом. Для создания же тахометрического расходомера скорость движения элемента надо предварительно преобразовать в сигнал, пропорциональный расходу и удобный для измерения. В этом случае необходим двухступенчатый преобразователь расхода. Его первая ступень — турбинка, шарик или другой элемент, скорость движения которого пропорциональна объемному расходу, а вторая ступень — тахометрический преобразователь, вырабатывающий измерительный сигнал, обычно частоту электрических импульсов, пропорциональную скорости движения тела. Здесь измерительным прибором будет электрический частотомер: цифровой или аналоговый. Если его дополнить счетчиком электрических импульсов, то получим наряду с измерением расхода также и измерение количества прошедшего вещества. Тахометрические расходомеры появились значительно позже упомянутых ранее счетчиков количества жидкости и газа и не получили еще столь широкого распространения. Их существенные достоинства — быстродействие, высокая точность и большой диапазон измерения. Так, если погрешность турбинных счетчиков воды (ось которых через редуктор связана со счетным механизмом) равна $\pm 2\%$, то у измерителей количества, имеющих тахометрический преобразователь, эта погрешность снижается до $\pm 0,5\%$. Причина в том, что этот преобразователь почти не нагружает ось турбинки в отличие от редуктора и счетного механизма. Погрешность же турбинного расходомера от 0,5 до 1,5 % в зависимости от точности примененного частотомера.

Крыльчатые и турбинные тахометрические расходомеры и счетчики количества могут изготавливаться для труб диаметром от 4 до 750 мм, для давлений до 250 МПа и температур от -240 до $+700$ °С. Поэтому они нашли широкое применение для измерения теплоносителя на энергетических установках. Основной недостаток турбинных расходомеров — изнашивание опор, и поэтому они непригодны для веществ, содержащих механические примеси. Кроме того, с увеличением вязкости вещества диапазон линейной характеристики уменьшается, что исключает их применение для очень вязких веществ. Но смазывающая способность измеряемого вещества желательна для турбинных расходомеров. Это делает их более пригодными для жидкостей, чем для газов.

Иногда для измерения расхода в трубах большого диаметра применяют маленькие крыльчатки и турбинки, занимающие небольшую часть площади сечения трубы. С помощью жесткой штанги они вводятся в центр или в другую точку сечения потока. Погрешность измерения расхода ориентировочно $\pm 5\%$.

Шариковые расходомеры появились позднее турбинных. Они служат для измерения расхода жидкостей, главным образом воды, в трубах диаметром до 150-200 мм. Их важное достоинство — возможность работы на загрязненных средах.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

Роторно-шаровые расходомеры появились сравнительно недавно и пока не получили широкого применения.

Камерные приборы как счетчики жидкости и газа наряду с турбинными применяют очень давно. Ранее их называли объемными приборами. Они отличаются большим разнообразием подвижных элементов, дающих наименование разновидностям этих приборов: роторные, поршневые, дисковые, с овальными шестернями, лопастные, винтовые и т. д. По сравнению с турбинными и шариковыми счетчиками количества они могут обеспечить большую точность и больший диапазон измерения. Так, несмотря на связь вала подвижного элемента с редуктором и счетным механизмом, погрешность у некоторых из них составляет всего $\pm(0,2 - 0,5) \%$. Кроме того, камерные счетчики пригодны для измерения количества жидкости любой вязкости, в том числе и очень большой. Но они чувствительны к загрязнениям и механическим примесям.

При необходимости иметь результаты измерения крыльчатыми, турбинными, шариковыми и камерными приборами в единицах массы их дополняют устройствами, корректирующими показания в зависимости от плотности измеряемого вещества или только от температуры — для жидкостей.

2. Разновидности крыльчатых и турбинных преобразователей

Аксиальные турбинки имеют винтовые лопасти с переменным по высоте углом подъема винтовой линии. Попытка применения плоских лопастей при измерении расхода вязких сред привела к ухудшению линейной характеристики. Но при измерении расхода газа и жидкостей с малой вязкостью их применение целесообразно. Схема аксиальной турбинки для труб небольшого диаметра показана на рис. 33, а.

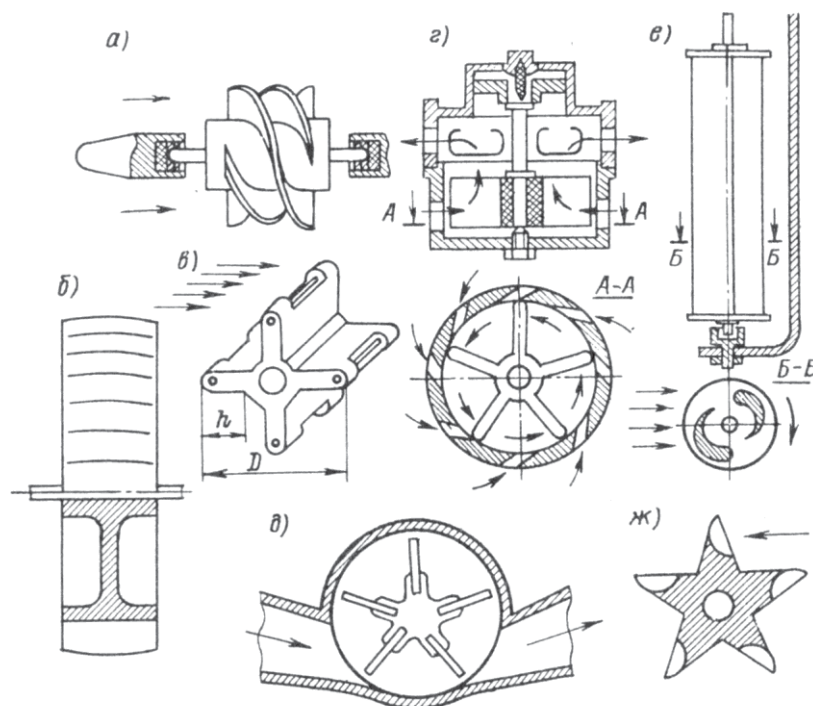


Рис. 33. Различные типы крыльчаток и турбинок: аксиальные при малом (а) и большом (б) диаметрах; тангенциальные со светоотражающими пластинками (в), в многоструйных водосчетчиках (г), в одноструйных водосчетчиках с полужилиндрическими лопастями (е) и лопастями полушаровой формы (ж)

Непосредственно на ступице установлены несколько лопастей (4-6), которые реализуют значительную часть винтовой линии. Ось турбинки вращается в подшипниках скольжения. В турбинках средних размеров применяют как подшипники скольжения, так и шарикоподшипники. При больших диаметрах (рис. 33, б) число лопастей возрастает до 20-

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
|-----|------|----------|-------|------|

24, но длина их по винтовой линии очень мала. Лопасты укрепляются на ободе, который соединяется со ступицей диском или ребрами. Поэтому высота их составляет небольшую долю ($0,1D_B$) диаметра турбинки. Подшипники обычно шариковые, оси могут быть как неподвижные, так и вращающиеся.

Конструкции тангенциальных турбинок более разнообразны. В большинстве случаев (рис. 33, в—д) поток жидкости одной общей струей поступает тангенциально к турбинке. В серийных одноструйных водосчетчиках применяют крыльчатки с плоскими радиально расположенными плоскостями (рис. 33, д). На рис. 33, в показана особая конструкция маленькой крыльчатки также с плоскими радиальными лопастями, на торцах которых расположены пластины, служащие для отражения луча, падающего от осветителя на фотоэлемент тахометрического преобразователя. Иногда для измерения расхода газа в трубах очень малого диаметра применяют турбины с лопастями полушаровой формы (рис. 33, ж).

Во избежание одностороннего изнашивания опор в одноструйных водосчетчиках применяют многоструйные водосчетчики, у которых вода поступает на радиальные лопасти крыльчатки тангенциально в виде нескольких отдельных струй (рис. 33, г) через косые отверстия, равномерно расположенные в кольце, охватывающем крыльчатку.

В трубах большого диаметра иногда применяют турбины, занимающие незначительную часть площади поперечного сечения потока и измеряющие местную скорость. Обычно они бывают аксиального типа. Но известны случаи применения турбины особого типа, состоящей из двух полуцилиндрических лопастей, сдвинутых относительно друг друга и имеющих сечение, показанное на рис. 33, е. Ось этой турбины перпендикулярна к потоку.

Срок службы турбинного преобразователя зависит главным образом от опорных узлов, работающих в тяжелых условиях (очень высокие скорости вращения, отсутствие смазочного материала, возможность динамических нагрузок, агрессивность некоторых измеряемых веществ). С уменьшением диаметра цапф осей снижается момент трения, но одновременно и срок службы преобразователя. Оси изготавливают из материалов с повышенной износостойкостью, остальные вращающиеся части — из алюминиевых сплавов и пластмасс, а при измерении расхода газа в некоторых случаях из полипропилена или полистирола для уменьшения нагрузки на опоры. Но при индукционных или индуктивных тахометрических преобразователях лопатки в большинстве случаев изготавливают из ферромагнитных материалов. Подшипники скольжения делают из графита или пластмассы, а при малых размерах — из часовых камней. Наконечники осей следует изготавливать из сплава иридий — осмий или других твердых материалов. Учитывая, что смазывающая способность многих жидкостей недостаточна, а у сухих газов она отсутствует, полезно покрывать шарикоподшипники специальными смазочными материалами типа Б-2-12 и 105-М, динамическая вязкость которых не превышает $1 \text{ Па} \cdot \text{с}$.

3. Критерии подоби́я у крыльчатых и турбинных расходомеров

Преобразователи расхода могут быть с аксиальной турбинкой и с тангенциальной крыльчаткой. У первых лопасти расположены по винтовой линии, а ось совпадает с осью потока. У вторых ось перпендикулярна к направлению потока, а прямые лопасти расположены радиально по отношению к оси. Крыльчатки применяют лишь при небольших диаметрах труб, обычно до 50 мм.

Зависимость числа оборотов n в единицу времени от объемного расхода q_0 у аксиальной турбины выражается в общем виде уравнением

$$n = \varphi(q_0, \nu, \rho, M_c, D, d_n, d_B, z, l, H),$$

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

где ν и ρ — кинематическая вязкость и плотность измеряемой жидкости; M_c — момент сопротивления тахометрического преобразователя; D — диаметр трубопровода; d_H и d_B — наружный и внутренний диаметры лопастей турбинки; z — число, а l — осевая длина лопастей; H — шаг лопастей по винтовой линии.

На основании π -теоремы подобия предыдущее уравнение может быть выражено в критериальной форме с помощью критериев подобия $\pi_1 = nD^3/q_0$; $\pi_2 = q_0/(\nu D)$; $\pi_3 = M_c D/(\rho q_0^2)$; $\pi_4 = d_H/D$; $\pi_5 = d_B/D$; $\pi_6 = z$; $\pi_7 = l/D$; $\pi_8 = H/D$; $nD^3/q_0 = f[q_0/(\nu D)$; $M_c D/(\rho q_0^2); d_H/D, d_B/D, z, l/D, H/D]$.

Для тангенциальной турбинки критерий H/D будет отсутствовать, а l будет обозначать высоту лопастей.

Для конкретной турбинки все критерии, кроме π_1 , π_2 и π_3 , будут постоянными. Поэтому отношение n/q_0 , входящее в критерий π_1 и являющееся основной характеристикой расходомера, будет зависеть только от числа $Re = \pi_2$ и от критерия $M_c D/(\rho q_0^2)$. Последний же может иметь практическое значение лишь вначале шкалы, так как с увеличением расхода q_0 он резко убывает, не говоря о том, что момент сопротивления M_c обычно очень мал. Поэтому характеристика расходомера определяется главным образом числом Рейнольдса. Это хорошо иллюстрирует рис. 34, а и б.

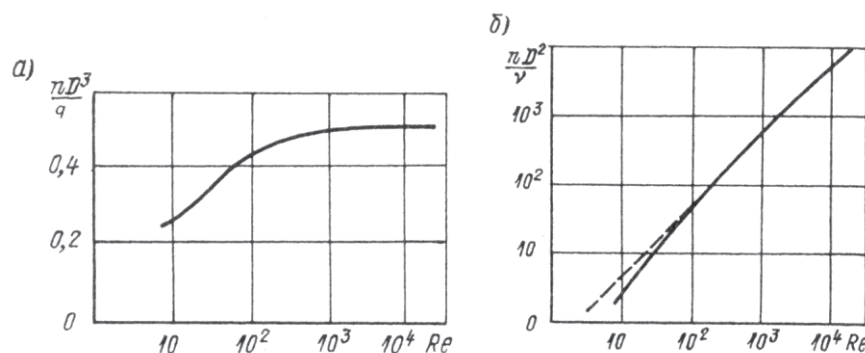


Рис. 34. Зависимость между критериями nD^3/q и Re (а) и nD^2/ν и Re (б) для турбинки с $D = 25$ мм

На первом из них построена кривая зависимости nD^3/q_0 от Re , а на втором — nD^2/ν от Re , полученные при испытании аксиальной турбинки, имевшей $D = 25$ мм, на жидкостях различных вязкостей от $6 \cdot 10^{-6}$ до $7 \cdot 10^{-4}$ м/с.

Из графиков следует, что при средних и больших значениях Re отношение n/q_0 сохраняет постоянное значение и шкала расходомера имеет почти линейный характер. Диапазон измерения q_{\max}/q_{\min} с линейной градуировкой, не зависящей от свойств (вязкости и плотности) вещества, возрастает от 5 – 10 при малых диаметрах труб и малых скоростях до 15–20 при больших скоростях и больших диаметрах. С уменьшением значения Re при переходе от турбулентного к ламинарному движению начинает все сильнее сказываться влияние вязкости, и относительная скорость вращения турбинки n/q_0 падает, градуировка становится нелинейной. Этому способствует и усиление влияния момента сопротивления M_c . Часто в переходной зоне от турбулентного к ламинарному движению вначале наблюдается даже некоторое повышение n/q_0 , и на соответствующей кривой в данном месте образуется максимум.

Нарушение линейности характеристики в некоторых случаях имеет место не только в области малых, но и в области больших значений Re .

4. Уравнение измерения для аксиальной турбинки

На рис. 35 показана схема скоростей жидкости на входе и выходе аксиальной турбинки, имеющей на некотором радиусе окружную скорость U . Очевидно, для достижения безударного входа потока на лопасти надо, чтобы их угол наклона φ возрастал с уменьшением значения r .

В идеальном случае при отсутствии сопротивления вращению турбинки абсолютная скорость на выходе c_2 равна скорости c_1 и, как и последняя, перпендикулярна к оси турбинки, а относительная скорость не только на входе w_1 , но и на выходе w_2 , будет совпадать с направлением лопасти, углы $\beta_1 = \beta_2 = \varphi$. При этом получим зависимость между расходом q_0 и идеальной угловой скоростью ω_u вращения турбинки в виде

$$q_0/s = U \operatorname{tg} \varphi = \omega_u \cdot r \cdot \operatorname{tg} \varphi,$$

где s — площадь поперечного сечения потока. Откуда

$$\omega_u = q_0 / rs \cdot \operatorname{tg} \varphi.$$

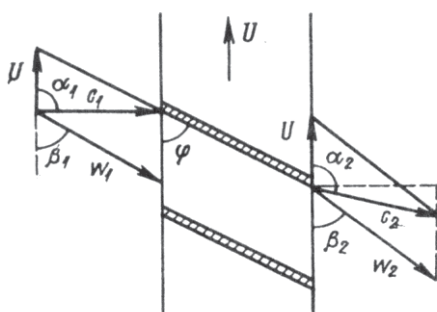


Рис. 35. Схема скоростей на входе и выходе аксиальной турбинки

Угловая скорость ω вращения реальной турбинки на 2— 5 % меньше идеальной ω_u из-за действия сил сопротивления, и поэтому скорости на выходе c_2 и ω_2 отклоняются в сторону, противоположную вращению турбинки ($\alpha_2 > \alpha_1$ и $\beta_2 > \beta_1$).

Разницу между ω_u и ω можно оценивать величиной

$$S_k = (\omega_u - \omega) / \omega_u$$

называемой скольжением турбинки относительно потока.

Из предыдущих двух уравнений получим, что

$\omega = q_0(1 - S_k)sr \cdot \operatorname{tg} \varphi$. Отсюда следует, что ω пропорционально q_0 при условии постоянства скольжения S_k .

Более развернутую зависимость между ω и q_0 можно получить из уравнения движения турбинки

$$Jd\omega/dt = M_d - \sum M_c.$$

Здесь J — момент инерции турбинки с учетом присоединенной к ней массы потока; M_d — движущий момент; $\sum M_c$ — сумма моментов сопротивления

$$M_c = M_\theta + M_m + M_n$$

где M_θ , M_m и M_n — моменты сил вязкого трения, сил трения в подшипниках и сопротивления тахометрического преобразователя (или редуктора) соответственно.

При $d\omega/dt = 0$ получим уравнение измерения турбинного расходомера

$$M_d = M_\theta + M_m + M_n.$$

Движущий момент M_d равен изменению момента количества движения массы, равной секундному расходу потока ρq_r . Элементарный момент

$$dM_d = (c_1 \cos \alpha_1 - c_2 \cos \alpha_2) r \rho dq_0.$$

Но

$$\cos \alpha_1 = 0; \quad c_2 \cos \alpha_2 = \omega_2 \cos \beta_2 - u = c_1 / \operatorname{tg} \beta_2 - wr.$$

Следовательно,

$$dM_d = (c_1 / \operatorname{tg} \beta_2 - \omega r) r \rho dq_0.$$

Здесь $c_1 = kq_0/s$; $dq_0 = c_1 ds = kq_0 ds/s$, где k — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скоростей по проточной части.

Подставляя эти значения c_1 и dq_0 в предыдущее уравнение, заменяя в нем $\operatorname{tg} \beta_2$ на ход

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

или шаг H лопастей и учитывая, что $\operatorname{tg} \beta_2 = \xi \operatorname{tg} \varphi = \xi H/2\pi r$, где ξ — коэффициент, зависящий от радиуса r , получим

$$dM_{\text{д}} = \left[(2\pi k / \xi s H) q_0^2 - \omega q_0 \right] (\rho k r^2 / s) ds.$$

Интегрируя по сечению s , найдем

$$M_{\text{д}} = a_1 q_0^2 - a_2 \omega q_0$$

где $a_1 = (2\pi \rho / s^2 H) \int_s (k^2 r^2 / \xi) ds$; $a_2 = (\rho / s) \int_s k r^2 ds$.

Основная часть момента $M_{\text{в}}$ образуется силами вязкого трения жидкости о проточную часть турбинки. Эта часть момента $M_{\text{в}}$ пропорциональна $s \rho q_0^2$, где s — коэффициент вязкого трения. Кроме того, небольшая часть момента $M_{\text{в}}$, пропорциональная угловой скорости ω , создается трением жидкости о ступицу турбинки. Поэтому имеем

$$M_{\text{в}} = a_3 q_0^2 + a_4 \omega,$$

где a_3 и a_4 — постоянные, зависящие от размеров и конструкции турбинки, а также от плотности и вязкости жидкости.

Момент трения в упорном подшипнике, пропорциональный ρq_0^2 , составляет основную часть момента $M_{\text{т}}$. Значительно меньше составляющая $M_{\text{т}}$ от трения в опорных подшипниках, определяемая нагрузкой и не зависящая от значений ω и q_0 . Следовательно,

$$M_{\text{т}} = a_5 q_0^2 + a_6,$$

где a_5 и a_6 — постоянные.

Момент $M_{\text{н}}$ в современных турбинных расходомерах очень мал и определяется лишь реакцией тахометрического (например, индукционного) преобразователя. Он имеет в большинстве случаев вид

$$M_{\text{н}} = a_7 \omega,$$

где a_7 — постоянная.

Если же турбинка механически связана с редуктором и далее со счетным или с другим механизмом, то момент $M_{\text{п}}$ будет много больше.

Подставляя полученные значения моментов $M_{\text{д}}$, $M_{\text{в}}$, $M_{\text{т}}$ и $M_{\text{н}}$ в уравнение измерения и решая его относительно ω , получим

$$\omega = A q_0 - (B + C),$$

где $A = (a_1 - a_3 - a_5)/a_2$; $B = (a_1 - a_3 - a_5) (a_6 + a_7)/a_2^2 [1 + (a_6 + a_7)/a_2 q_0]$; $C = a_2 a_6 / (a_2 q_0 + a_6 + a_7)$.

Формулы, дающие зависимости постоянных a_3 , a_4 , a_5 и a_6 от параметров жидкости и конструктивных размеров приведены в экспериментальных работах.

При условии постоянства значений A , B и C уравнение измерения ω выражает прямую линию, пересекающую ось q_0 на расстоянии $(B + C)/A$ от нулевой точки под углом, тангенс которого равен A . В действительности величины A , B и C зависят от q_0 . Влияние величин B и C , зависящих от трения о торец ступицы, от трения в опорном подшипнике и реакции тахометрического преобразователя, сравнительно невелико. Поэтому сохранение пропорциональности между ω и q_0 будет зависеть от постоянства A , которое определяется постоянством значений a_1 , a_2 , a_3 и a_5 . Из них первые два зависят от плотности ρ и эпюры скоростей, а вторые — от сил вязкостного трения, с изменением которых будут изменяться значения не только a_3 , но и a_5 , так как осевая сила, создающая трение в упорном подшипнике, в значительной мере возникает под давлением жидкостного трения о лопасти турбинки.

5. Примеры расходомеров с аксиальной турбинкой и тангенциальной крыльчаткой

а) Водосчетчик типа УВТ (Вольтмана)

Уже много лет широкое применение имеют счетчики жидкости воды, аксиальная турбинка которых через шестеренчатый редуктор связана со счетным механизмом. Ранее они нередко именовались счетчиками Вольтмана, с горизонтальной или вертикальной осью. На рис. 36 показано устройство одной из моделей такого водосчетчика типа УВТ. Вода поступает в турбинку 7, пройдя через струевыпрямитель 8, в ребрах которого укреплен обтекатель 10, содержащий передний подшипник 9 оси турбинки. У струевыпрямителя одна из лопастей 6 может поворачиваться при вращении регулировочного винта, который затем закрывается крышкой и пломбируется.

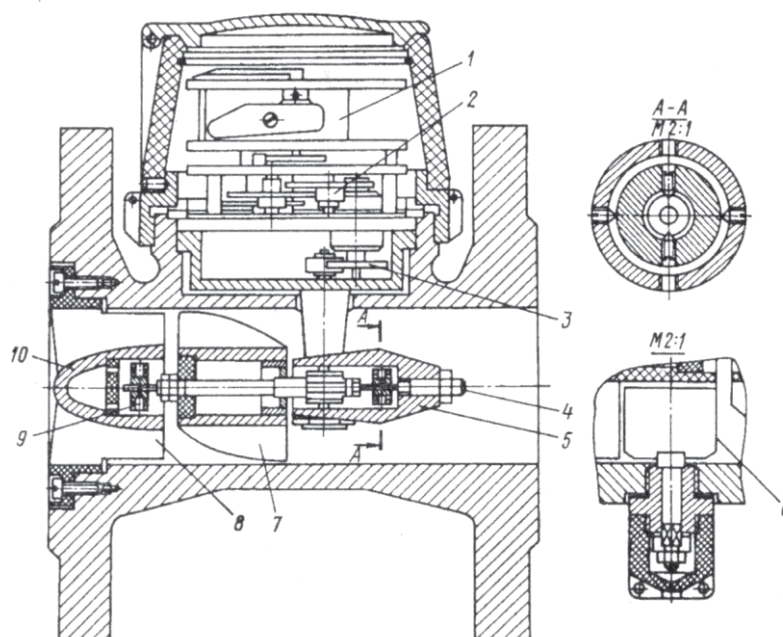


Рис. 36. Счетчик воды УВТ с аксиальной турбинкой

Задний подшипник вместе с упорным, выполненным в виде регулируемого винта 4 с агатовым наконечником и червячной парой, передающей вращение от турбинки паре сменных шестерен 3, заключены внутри кронштейна 5. В нем же находятся и опоры вертикальной оси червячного колеса. Размещение этих опор в одной детали позволяет устранить биение оси и быстрый износ зубчатых колес, имевший место в прежних конструкциях. Шестерня 3 вращает магнитную полумуфту, отделенную водонепроницаемой диамагнитной перегородкой от второй магнитной полумуфты, соединенной с редуктором 2, и через последний со счетным роликовым механизмом 1, имеющим стрелочный указатель. Общее передаточное число редуктора 1:88,25. В отличие от более старых конструкций здесь не только счетный механизм, но и редуктор отделены от воды, а благодаря применению магнитной передачи нет трения оси, связывающей редуктор и счетный механизм, в сальниковом уплотнении.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
| | | | | |

НГТУ – 070500 – (М08 – АЭ – 2) – Р

Лист

46

б) Безопорный турбинный преобразователь расхода

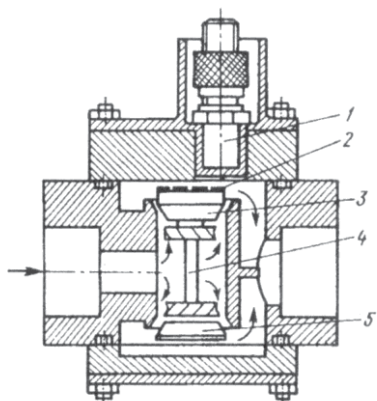


Рис. 37. Безопорный турбинный преобразователь

Резко отличны по своему устройству от всех ранее рассмотренных преобразователей с аксиальной турбинкой безопорный преобразователь, изготавливаемый в Англии (рис. 37), а также два преобразователя расхода газа, разработанные в Японии. На оси 4, перпендикулярной к потоку жидкости, укреплены две турбинки и два диска 3 и 5 с конической баковой поверхностью. При появлении расхода возникает разность давлений на входе и выходе из преобразователя, которая приподнимает ось с дисками, и поток, разделяясь на две ветви, вращает обе турбинки со скоростью, пропорциональной объемному расходу. Магнитные головки 2, укрепленные на верхнем диске 3, при вращении последнего

создают в индукционном преобразователе 1 импульсы тока, частота которых пропорциональна частоте вращения турбинок. Потеря давления при q_{max} около 55 кПа. Подобные преобразователи расхода допускают механические примеси размером до 0,25 мм и изготавливают четырех типов размеров — на расходы от 6 до 72 м³/ч. Диапазон измерения в линейной области равен 3,5 (линейность $\pm 0,5$ %), а общий диапазон равен 20 (линейность ± 2 %). В зависимости от материалов допустимы давление до 2 МПа и температура до 140 °С.

в) Многоструйный водосчетчик типа ВСКМ с тангенциальной турбинкой

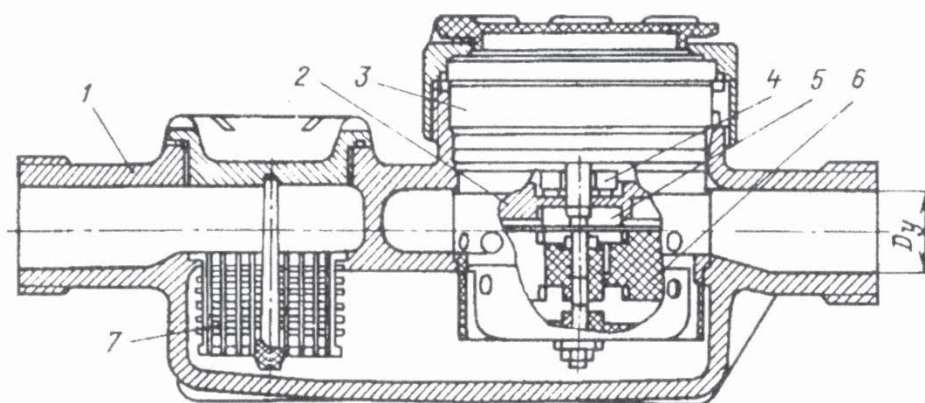


Рис. 38. Многоструйный счетчик воды ВСКМ с тангенциальной крыльчаткой

Устройство многоструйного водосчетчика типа ВСКМ приведено на рис. 38. В корпусе 1 перед входом воды в водосчетчик установлен сетчатый фильтр 7. Не только счетный механизм 3, но и соединенный с ним редуктор отделены диамагнитной перегородкой 2 от воды. На турбинке 6 имеются ведущие магниты 5, которые через перегородку 2 передают вращение ведомым магнитам 4 и далее редуктору и счетному механизму. Отличающийся компактностью узел счетного механизма с редуктором может изготавливаться отдельно от остальных частей крупносерийно на специализированном предприятии. Необходимо лишь иметь такой диаметр турбинки, который обеспечивает достаточно большой вращающий момент.

6. Шариковые расходомеры

Шариковыми расходомерами называются тахометрические расходомеры, подвижной элемент которых — шарик — непрерывно движется по кругу. Это движение обеспечивается или винтовым направляющим аппаратом, закручивающим поток, или же тангенциальным подводом измеряемого вещества.

На рис. 39 показаны преобразователи шариковых расходомеров. Основное применение из них получил преобразователь с винтовым направляющим аппаратом 1 (рис. 39, а). Поток, закрученный в последнем, приводит в движение ферромагнитный шарик 5 по окружности трубы. Частота вращения шарика по кругу преобразуется в электрический частотный сигнал индукционным или индуктивным преобразователем 2. Ограничительное кольцо 3 удерживает шарик от перемещения вдоль оси трубы. Для выпрямления потока на выходе служат неподвижные лопасти 4. Преобразователи с тангенциальным подводом измеряемого вещества, показанные на рис. 39, б, в, применяют при измерении малых расходов. Они проще и опасность засорения у них меньше. Во всех случаях шар под действием центробежной силы прижимается к внутренней поверхности трубы (рис. 39, а) или камеры (рис. 39, б, в), а под действием осевой скорости потока (рис. 39, а) или веса (рис. 39, б, в) — к ограничительному кольцу. При этом возникают силы механического трения, которые вместе с вязкостным трением жидкости тормозят шар. В результате окружная скорость центра шара отстает от соответствующей окружной скорости потока. Это учитывается при измерении расхода.

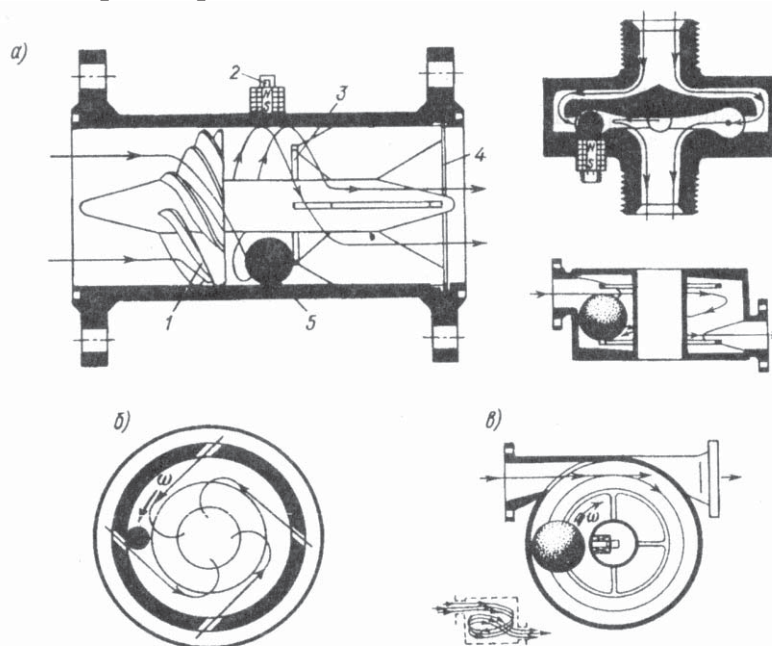


Рис. 39. Преобразователи расхода шариковых расходомеров: а — с винтовым направляющим аппаратом (НИИтеплоприбор); б — с тангенциальным подводом (фирмы Бопп—Рейтер); в — с тангенциальным подводом (НИИтеплоприбор)

В качестве примера рассмотрим шариковый расходомер типа «Шторм-8А», разработанный в НИИ теплоприбор. Его преобразователь расхода типа «Шадр-8А» изображен на рис. 40.

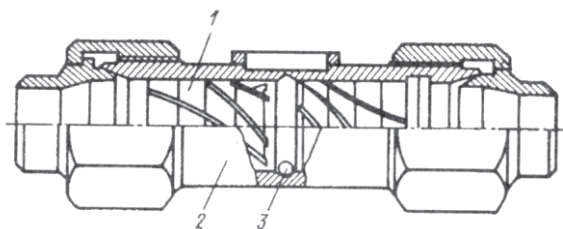


Рис. 40. Шариковый преобразователь расхода «Шадр-8А» у расходомера «Шторм»

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
| | | | | |

НГТУ – 070500 – (М08 – АЭ – 2) – Р

Лист

48

В корпусе 2 располагается неподвижный узел, содержащий ступицу и два направляющих аппарата 1 с ограничительными кольцами. Между последними в канавке находится ферромагнитный шарик 3. С наружной стороны корпуса имеется место для закрепления на винтах тахометрического индукционного преобразователя типа МИП-1, состоящего из катушки и магнитного сердечника. Расходомер «Шторм-8А» предназначен для измерения расхода дистиллята в пределах 2-8 м³/ч при давлении 5 МПа и температуре 2-100 °С в трубе диаметром 32 мм. Погрешность $\pm 1,5\%$ в диапазоне от 20 до 100 % q_{max} . Потеря давления 50 кПа при q_{max} . Кроме того, имеется расходомер «Шторм-32М», преобразователь которого «Шадр-32М» предназначен для размещения в конкретных энергетических установках и не имеет прочного корпуса. Измеряемые расходы жидкости от 8 до 50 м³/ч при давлении 10 МПа и температуре 2-285 °С в трубе диаметром 60 мм. Погрешность $\pm 1,5\%$ в диапазоне от 20 до 100 % q_{max} . Потеря давления 25 кПа при q_{max} .

7. Роторно-шаровые расходомеры

У роторно-шаровых расходомеров в отличие от шариковых шар или другое тело вращения движется не по кругу, а вращается вокруг своей оси под воздействием потока измеряемого вещества. Иногда эти приборы называют расходомерами с левитирующим шаром или расходомерами с гидродинамической подвеской ротора. Они пока не нашли широкого применения, однако имеется несколько их разновидностей, отличающихся друг от друга, в частности, способом приведения шара во вращение.

Преобразователь расхода одного из таких расходомеров типа «Глобус» показан на рис. 41.

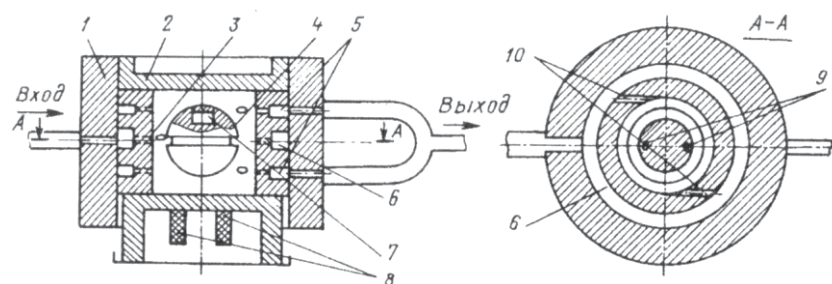


Рис. 41. Преобразователь расхода расходомера «Глобус» (с шаровым ротором)

В корпусе 1 запрессована втулка 3, внутри которой находится шар 4. Последний имеет канавку на горизонтальной окружности и, кроме того, для обеспечения надлежащей своей ориентации в пространстве воздушную полость, в верхней части закрываемую пробкой 7. Втулка 3 закрыта сверху крышкой 2, а снизу крышкой, в которой расположены две индукционные катушки 8 тахометрического преобразователя. Жидкость через отверстие в корпусе 1 входит в кольцевой коллектор 6, откуда через два тангенциальных отверстия 10 диаметром 0,4 мм поступает в камеру, где расположен шар, и вызывает его вращение. При этом гидродинамические силы способствуют такому расположению шара по высоте, при котором его канавка оказывается в зоне действия струй, вытекающих из отверстий 10. Вращение шара с помощью двух находящихся в нем магнитных стержней 9 и индукционных катушек 8 преобразуется в модулированный электрический сигнал. Жидкость удаляется через два кольцевых коллектора 5 в выходную трубу. Расходомер «Глобус» рассчитан на расходы от $0,3 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-6}$ м³/с и давление до 25 МПа. Приведенная погрешность $\pm 1\%$. Потеря давления при расходе $3 \cdot 10^{-6}$ м³/с не более 0,03 МПа. Допустимы механические примеси в жидкости при размере частиц не более 0,04 мм (0,1 от диаметра тангенциальных отверстий). Градуировочная характеристика расходомера достаточно линейна. Некоторую

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

аналогию с преобразователем расходомера «Глобус» имеет безопорный преобразователь с вращающимся кольцевым диском. Жидкость тангенциально поступает в камеру и приводит во вращение кольцевой диск, наружный диаметр которого на 5 % меньше внутреннего диаметра камеры. Частота вращения диска преобразуется в импульсы тока с помощью светлых меток, нанесенных на торцевой поверхности диска, видимых посредством волоконного оптического устройства и воздействующих на фотодетектор. Диапазон измерения от 0,06 до 6 мл/с.

Принципиальная схема другой разновидности преобразователя расходомера с шаром, вращающимся вокруг своей оси, приведена на рис. 42.

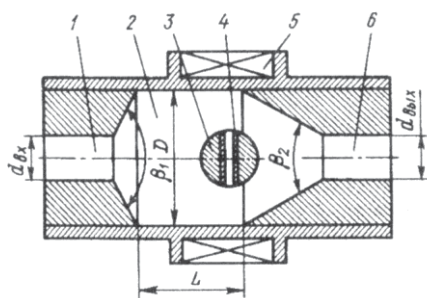


Рис. 42. Схема преобразования расхода с взвешенным шаром

В основе его работы лежит следующее явление. Шар 3, помещенный в полости 2 определенной геометрической формы, в которую жидкость поступает через входное отверстие 1 и уходит через выходное отверстие 6, будет взвешиваться потоком и занимать определенное положение, начиная с некоторого значения расхода. Если такой шар снабдить сквозным диаметрально отверстием, то он будет вращаться со скоростью, пропорциональной объемному расходу жидкости, вокруг оси, перпендикулярной к оси потока.

Для передачи частоты вращения шара в него запрессовывается магнитная вставка 4, а снаружи диамагнитного корпуса преобразователя помещается индукционный узел 5 съема сигнала.

Камерные расходомеры

1. Общая характеристика

Камерными называются тахометрические расходомеры и счетчики, подвижные элементы которых приходят в движение (непрерывное или периодическое) под давлением измеряемой жидкости или газа и при этом отмеривают определенные объемы или массы измеряемого вещества.

Некоторые разновидности камерных приборов применяют уже давно в качестве водо- и газосчетчиков. При этом их подвижные элементы обычно через зубчатый редуктор соединены со счетным механизмом. Несмотря на трение в последних, большинство камерных счетчиков имеют высокий класс точности. Так, погрешность счетчиков газа до $\pm 1\%$, а счетчиков жидкости равна $\pm(0,2-1)\%$. Диапазон их измерения также достаточно большой и находится в пределах от 5 : 1 до 20 : 1 и даже более. Вязкость измеряемого вещества меньше влияет на показания камерных приборов по сравнению с турбинными. Но конструктивно камерные приборы сложнее турбинных и шариковых и поэтому малопригодны при больших расходах измеряемого вещества. Их редко применяют в трубах, диаметр которых более 200 – 300 мм. Кроме того, они весьма чувствительны к механическим примесям и требуют хорошей фильтрации жидкости и газа. В качестве расходомеров камерные приборы применяют пока еще редко. Но такое применение в будущем весьма перспективно, особенно при отказе от механической связи между подвижными элементами и отсчетным устройством. Это позволит еще больше повысить точность измерения расхода и количества. В простейшем же случае можно ограничиться лишь добавлением тахометрического преобразователя к существующим конструкциям приборов.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

Камерные счетчики имеют большое число различных разновидностей (рис. 43, а—н).

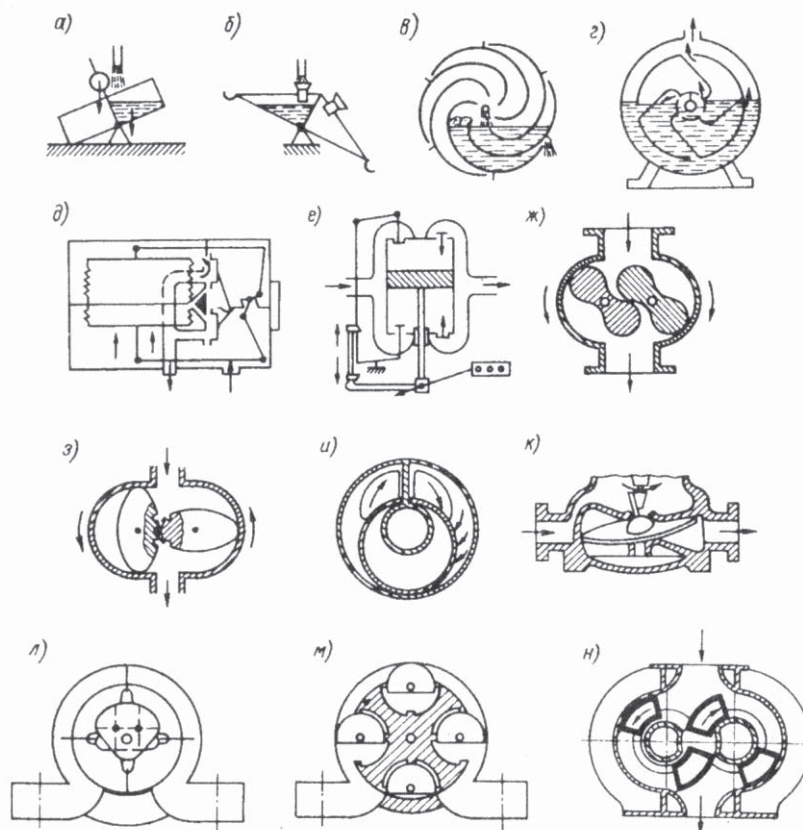


Рис. 43. Различные типы камерных преобразователей расхода: а — опрокидывающийся гравиметрический; б — опрокидывающийся объемный; в — барабанный для жидкости; г — барабанный для газа («мокрые газовые часы»); д — с эластичными стенками («сухие газовые часы»); е — поршневой; ж — ротационный с восьмеркообразными роторами; з — зубчатый с овальными шестернями; и — кольцевой; к — дисковый; л — лопастной; м — ковшовый; н — ротационный с трапецидальными роторами

Все они могут быть объединены в три группы:

- 1) без движущихся разделительных элементов;
- 2) с эластичными стенками камер;
- 3) с движущимися разделительными элементами.

Приборы 1-й группы (рис. 43, а—г) состоят из одной или нескольких мерных камер, которые последовательно опорожняются и заполняются. К ним относятся опрокидывающиеся, измеряющие массу (рис. 43, а) или объем (рис. 43, б) жидкости; вращающиеся барабанные, измеряющие объем жидкости (рис. 43, в) или газа (рис. 43, г); приборы с колеблющимся колоколом. Кроме того, к этой же группе камерных счетчиков могут быть условно отнесены мерные емкости с сильфонным или клапанным опорожнением. Счетчики без движущегося разделительного элемента — наиболее точные. Но они служат для измерения лишь небольших расходов и только при ограниченном давлении измеряемого вещества.

Представитель приборов 2-й группы — газосчетчик с эластичными стенками двух (рис. 43, д) или более камер, которые последовательно заполняют и опорожняют при их непрерывном возвратно-поступательном движении. Газораспределительный механизм золотниковый или клапанный. Подобные приборы находят широкое применение при измерении газа, расходуемого мелкими потребителями.

Приборы 3-й группы имеют наибольшее число разновидностей и применяются часто (рис. 43, е—н). Они состоят из жесткой камеры, в которой при непрерывном перемещении одного (рис. 43, е, и, к) или нескольких (рис. 43, ж, з, л, м, н) разделительных элементов (поршня, диска, роторов и т. п.) осуществляется отмеривание объемов жидкости или газа. Перечислим основные их разновидности.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

Поршневые счетчики могут быть однопоршневыми (рис. 43, *е*) и многопоршневыми с коленчатым валом или распределительным диском. Они отличаются высокой точностью и применяются для измерения расхода нефтепродуктов.

Роторные счетчики отличаются друг от друга формой и числом роторов. Последние могут быть одинаковыми, например, восьмеркообразными (рис. 43, *ж*), трапецеидальными (рис. 43, *н*) или же различными. Широко применяются в качестве газосчетчиков.

Зубчатые счетчики имеют две резко отличные друг от друга разновидности: счетчики с овальными шестернями (рис. 43, *з*) и счетчики винтовые, состоящие из двух-трех роторов винтовой формы. Те и другие предназначены для измерения жидкостей, причем винтовые лишь при весьма малых расходах. Основное применение имеют счетчики с овальными шестернями для измерения жидкости самой различной вязкости, в том числе и очень высокой. Погрешность $\pm 0,5\%$ от измеряемого значения.

У кольцевых счетчиков (рис. 43, *и*) кольцо совершает сложное движение. Оно катится внутри цилиндрической камеры и одновременно скользит вдоль перегородки, разделяющей отверстия для входа и выхода. Погрешность $\pm(0,2-0,5)\%$. Благодаря удобству разборки и чистки применяется преимущественно для измерения жидкостей в пищевых производствах.

У дисковых счетчиков (рис. 43, *к*) диск с шаровой пятой совершает сложное колебательное движение между конусообразными поверхностями камеры. Ранее дисковые счетчики жидкости широко применялись.

Лопастные счетчики могут быть со скользящими или же со складывающимися лопастями. Наибольшее применение имеют первые. При вращении цилиндрического ротора внутри измерительной камеры лопасти скользят в прорезях ротора. Лопасти имеют либо кулачковое управление (рис. 43, *л*) либо движутся, упираясь пружинами в стенку камеры. Предназначены для измерения жидкости в трубах диаметром 100 – 200 мм. Погрешность $\pm 0,2\%$ в диапазоне 3:1.

Ковшевые счетчики (рис. 43, *м*) состоят из ротора крестообразной формы, на котором укреплены оси четырех полуцилиндрических ковшей. Под влиянием разности давлений на ковши, находящиеся у входа и выхода жидкости, ротор вращается. При этом ковши поворачиваются вокруг своих осей, но так, что их наклон к горизонтальной оси счетчика остается неизменным. Предназначены для измерения жидкости в трубах большого диаметра от 200 до 400 мм.

2. Примеры камерных расходомеров и счетчиков

а) Барабанные счетчики

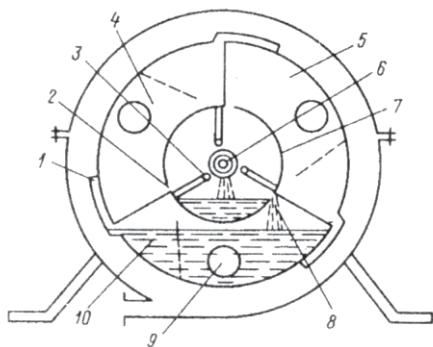


Рис. 44. Барабанный трехкамерный счетчик жидкости

Состоят из барабана, разделенного перегородками той или иной формы на несколько равновеликих измерительных камер. Смещение центра тяжести барабана от вертикали, проходящей через ось его вращения, при поступлении в него жидкости вызывает периодический или непрерывный поворот барабана. В счетчиках газа барабан непрерывно поворачивается под действием разницы давлений газа на входе и выходе. Барабанные счетчики применяют лишь для измерения объемного количества жидкости или газа. Но в случае изготовления барабанного счетчика жидкости с противодействующим контргрузом он может измерять массу прошедшей жидкости.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
|-----|------|----------|-------|------|

На рис. 44 показано устройство наиболее распространенного трехкамерного барабанного счетчика жидкости. Вокруг оси счетчика имеется кольцевая трубка 6, по которой поступает жидкость, выливающаяся затем во внутренний цилиндр 7. Последний имеет три щелевых отверстия, сообщающиеся с измерительными камерами. Из цилиндра 7 жидкость через нижнюю щель 8 перетекает в измерительную камеру 10. При этом равновесие счетчикане нарушается, так как камера занимает симметричное положение относительно центральной вертикальной оси. После заполнения камеры 10 станет повышаться уровень в цилиндре 7 и жидкость через щель 2 начнет заполнять камеру 4. Тогда центр тяжести сместится влево, и счетчик повернется на 120° против часовой стрелки. Жидкость через отверстие 1 выльется из камеры 10 в корпус прибора, соединенный с выходной трубкой, а камера 4, продолжая заполняться, займет нижнее положение. Трубочки 3, заканчивающиеся открытыми концами в торцевой стенке счетчика, служат для удаления воздуха из камер 4, 5 и 10. Стаканчики 9, впаиваемые в торцевые стенки камер, позволяют точно подогнать объем последних к заданному расчетному значению. Во избежание быстрого опорожнения камер и возможного проскакивания барабана с преждевременным попаданием жидкости в соседнюю камеру делают перегородки (показаны штриховой линией), которые тормозят выливание жидкости.

Подобные счетчики применяют для измерения количества различных жидкостей, причем для агрессивных их изготавливают из керамических материалов.

б) Поршневые расходомеры и счетчики

Поршневые счетчики жидкости ранее применяли для измерения воды. Сейчас благодаря высокой точности измерения (погрешность не более $\pm 0,5-1\%$) они служат главным образом для измерения расхода нефтепродуктов. Число поршней у счетчика бывает различным. Чаще всего встречаются счетчики с одним, двумя, четырьмя и шестью поршнями. Распределительное устройство обычно золотниковое, иногда в виде четырехходового поворотного крана. В отличие от других камерных приборов, имеющих зазор между корпусом и подвижным элементом, поршень имеет уплотнение в виде манжет из кожи, пластмассы, мягкого материала или же в виде колец из резины или меди. Поршневые счетчики и расходомеры в настоящее время применяются лишь при небольших расходах в трубах, диаметр которых обычно не превышает 50 мм. Вследствие возвратно-поступательного движения поршней скорость их невысока и при больших калибрах поршневые приборы становятся слишком громоздкими.

Одним из первых поршневых счетчиков отечественного производства был однопоршневой водосчетчик с вертикальным ходом поршня на калибры 40 и 50 мм и q_{\max} , равным 12 и 20 м³/ч соответственно. Позже стали применять расходомер мазут типа МП со счетчиком, имеющей четыре вертикально расположенных цилиндра с поршнями, штоки которых упираются в распределительный диск и вызывают как его движение, так и вращение связанного с ним центрального вала. Кривошип последнего управляет движением золотника, обеспечивающего последовательное соединение цилиндров с входным и выходным отверстиями. Счетчик числа оборотов центрального вала измеряет количество прошедшего мазута, а фрикционный тахометр, измеряющий частоту вращения этого вала, — расход мазута. С помощью ферродинамического преобразователя показания расходомера могут быть переданы на вторичный прибор. Расходомеры МП имеют три калибра: 15, 25 и 32 мм — и соответствующие максимальные пределы измерения: 0,25, 1,25 и 4,0 м³/ч. Погрешность измерения расхода $\pm 2,5\%$ у калибра 15 мм, у двух остальных $\pm 1,5\%$. Погрешность измерения количества $\pm 1\%$. Предельное давление 1 МПа, потеря давления 35 кПа, допустимая вязкость жидкости от $20,4 \cdot 10^{-6}$ до $89 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

В качестве примера рассмотрим четырехпоршневой счетчик бензина, который широко используется в топливозаправочных колонках (рис. 45).

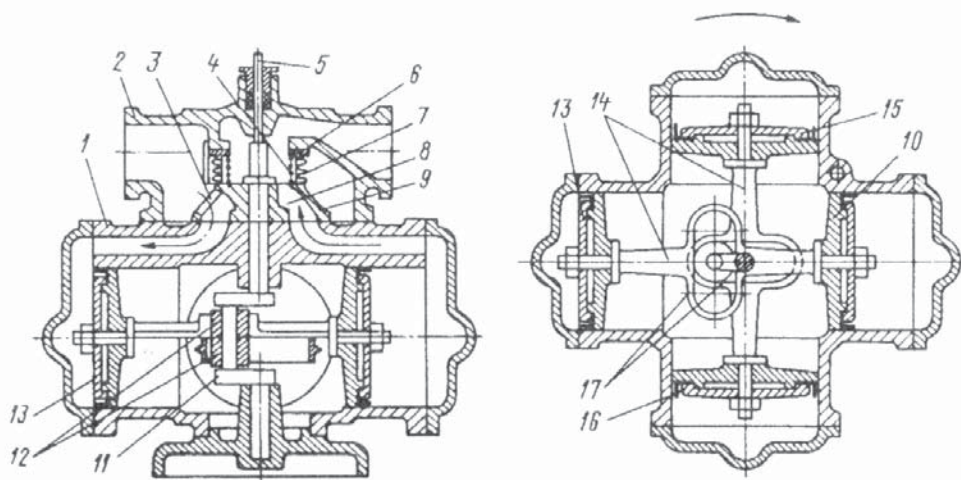


Рис. 45. Четырехпоршневой счетчик бензина

В четырехцилиндровом блоке 1 перемещаются четыре поршня, штоки которых 14 через кулисы 17 и ролики 12 приводят во вращение коленчатый вал 11, а вместе с ним золотник 9 и валик 5, связанный со счетным механизмом. Золотник 9, имеющий форму усеченного конуса, расположен в распределительной головке 2 и притерт к опорной поверхности блока 1. Плотность прилегания золотника обеспечивается двумя пружинами: гофрированной цилиндрической 7 с опорным кольцом 6 и расположенной внутри нее винтовой пружиной 4. В положении, показанном на рисунке, жидкость через отверстие 3 начинает поступать к поршню 13, находящемуся в крайнем положении, и продолжает поступать к поршню 15, уже прошедшему половину пути. Одновременно поршни 10 и 16, соединенные штоками с поршнями 13 и 15, перемещают уже отмеренную жидкость через отверстие 8 к выходному штуцеру. Когда поршень 15 дойдет до своего крайнего положения, золотник 9 сообщит пространство у поршня 16 с входным 3, а у поршня 15 с выходным 8 отверстиями, и эти поршни начнут обратное движение. Поршни же 13 и 10 будут продолжать свое первоначальное движение, пока не придут в крайнее положение. Диаметр поршней 70 мм, их ход 32,5 мм, измерительный объем каждого поршня 125 см³. За один оборот вала измеряется 500 см³, что при наибольшей частоте вращения вала 80 об/мин даст расход бензина, равный 2,4 м³/ч. Погрешность измерения $\pm 0,5$ %.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

Электромагнитные расходомеры

Широко используются в тепловых сетях. Принцип действия их основан на законе электромагнитной индукции. В соответствии с которым электропроводная жидкость, пересекающая магнитное поле индуцирует ЭДС, пропорциональную скорости движения жидкости.

Принципиальная схема электромагнитного расходомера приведена на рис. 46.

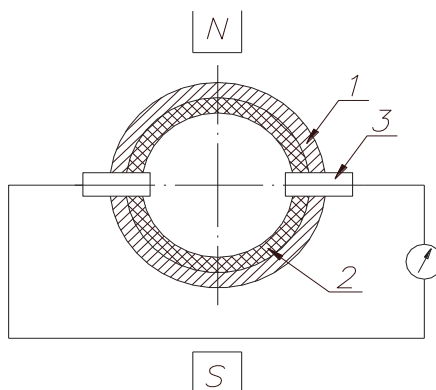


Рис. 46. Схема электромагнитного расходомера.

Корпус поверхности 1 изготавливают из немагнитного материала, изнутри покрытого изоляцией 2. Изоляция расположена между полюсами магнита. Через стенку трубы введены электроды 3. Силовые линии магнитного поля направлены перпендикулярно плоскости, проходящей через ось трубы и линию электродов.

В соответствии с законом электромагнитной индукции в жидкости будет наводиться ЭДС:

$$E = B \cdot D \cdot v,$$

но учитывая что $v = \frac{4Q}{\pi \cdot D^2}$, то получаем:

$$E = \frac{4BQ}{\pi \cdot D},$$

т.е. ЭДС пропорциональна расходу.

Основной недостаток этого расходомера в том, что он реагирует на взвешенные частицы.

Акустические расходомеры

Обычно в качестве акустических используются ультразвуковые расходомеры. Ультразвуковой метод измерения расхода основан на зависимости изменения параметров волны от скорости потока.

Существует несколько разновидностей ультразвуковых методов измерения расхода.

1. Метод при котором измеряемый параметр – амплитуда.

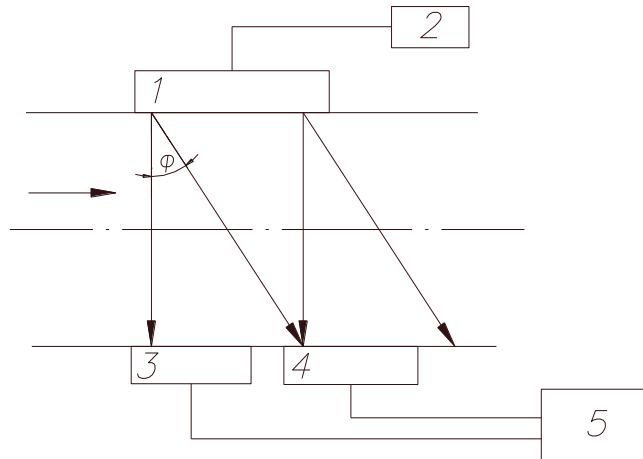


Рис. 47. Схема ультразвукового расходомера, измеряющего сдвиг амплитуды.

На рис. 47. показан принцип действия расходомера такого типа: 1 – измеряющий пьезоэлемент, 2 – генератор, 3, 4 – приемные пьезоэлементы, 5 – усилитель.

Когда поток неподвижен, то амплитуда принятых сигналов одинакова.

$$\Phi = \arcsin \frac{v_{cp}}{c} \quad \Phi \approx \frac{v_{cp}}{c}$$

2. Метод основанный на эффекте Доплера.

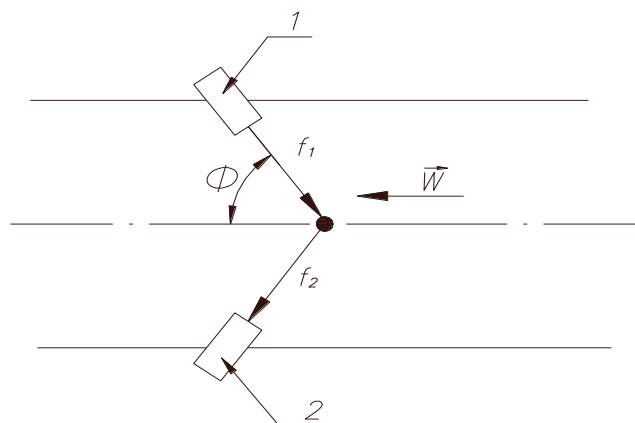


Рис. 48. Схема ультразвукового расходомера, реагирующего на передвижение взвешенных частиц

Излучатель 1 (рис. 48.) излучает импульс с частотой f_1 , который после столкновения с частицей, находящейся в жидкости преобразуются в импульс с частотой f_2 , который улавливается приемником 2.

$$f_1 - f_2 = 2f_1 \cos \Phi \cdot \frac{W}{c}$$

3. Фазовый (времяпролетный) метод.

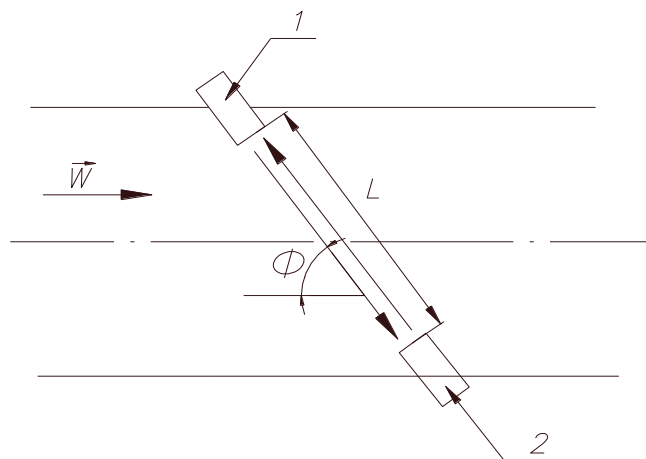


Рис. 49. Схема ультразвукового расходомера, измеряющего время прохождения сигнала через движущийся поток

$$\tau_1 = \frac{L}{c + W \cos \Phi}$$

Против потока $\tau_2 = \frac{L}{c - W \cos \Phi}$

$$\Delta \tau = \tau_1 - \tau_2 = \frac{2LW}{c^2}$$

Достоинства акустических расходомеров следующие: отсутствие трущихся частей, высокое быстродействие.

Недостаток: зависимость показаний от скорости звука среды.

Ионизационные расходомеры

1. Физический принцип радиационного метода измерения расхода

Рассмотрим два прямолинейных участка трубопровода ГП ядерного реактора типа ВВЭР (рис. 50).

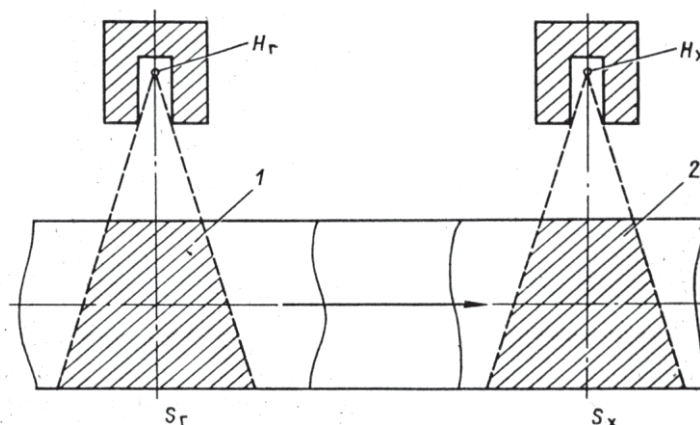


Рис. 50. Схема расположения детекторов γ -излучения на горячей и холодной нитках ГП: 1 и 2 — соответственно горячий и холодный участки ГП; H_r и H_x — точки детектирования; S_r и S_x — плоскости поперечных сечений ГП горячих и холодных ниток соответственно

Стрелкой показано направление движения потока теплоносителя первого контура, причем участок 2 расположен относительно участка 1 ниже по потоку. Практически целесообразно выбирать участки трубопровода 1 и 2, расположенные на выходе из реактора (горячая нитка ГП) и на входе в реактор (холодная нитка ГП). В связи с этим в дальнейшем для удобства изложения будут использоваться индексы «r» и «x», обозначающие принадлежность к горячей (участок 1) и холодной (участок 2) ниткам ГП соответственно. Пунктирными линиями на рисунке условно обозначены элементы ГП, расположенные между рассматриваемыми участками трубопровода.

Пусть вблизи участков трубопровода 1 и 2 в плоскостях поперечных сечений S_r и S_x установлены два детектора γ -излучения в точках детектирования H_r и H_x . Детекторы размещены в защитных коллиматорах с коллимационными отверстиями, ориентированными на соответствующие участки трубопровода. Таким образом, детекторы регистрируют γ -излучение от теплоносителя, заключенного в ограниченных фиксированных объемах трубопровода ΔV_r и ΔV_x , попадающих в «поле зрения» детекторов (на рис. 50 эти объемы обозначены заштрихованными областями). Как правило, объемы ΔV_r и ΔV_x достаточно малы, и в пределах каждого из них можно считать активность изотопа ^{16}N распределенной равномерно, а плотность теплоносителя постоянной.

Обозначим ρ_r , ρ_x плотность теплоносителя в горячей и холодной нитках соответственно; a_r , a_x — удельная активность изотопа ^{16}N в объемах ΔV_r и ΔV_x соответственно (активность изотопа ^{16}N , содержащегося в единице массы теплоносителя).

Выделим в потоке элемент массы теплоносителя. Пусть в начальный момент времени ($t = 0$) он находится в окрестности сечения S_r , тогда удельная активность содержащегося в нем изотопа ^{16}N будет равна a_r (так как в этот момент он принадлежит объему ΔV_r). По прошествии некоторого времени t_{mp} (время транспорта теплоносителя) выделенный элемент массы теплоносителя, двигаясь вместе с потоком по трубопроводу, окажется в окрестности сечения S_x . За это время вследствие распада ядер, изотопа ^{16}N удельная

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
|-----|------|----------|-------|------|

активность уменьшится до значения a_x . Причем в соответствии с законом радиоактивного распада справедливо соотношение $a_x = a_r \exp(-\lambda t_{mp})$, где λ — постоянная распада изотопа ^{16}N . Выполнив преобразование этого соотношения для t_{mp} , получим:

$$t_{mp} = \ln(a_r / a_x) / \lambda. \quad (1)$$

Нетрудно заметить, что за время t_{mp} через поперечное сечение трубопровода S_x (равно как и через любое другое сечение ГП) пройдет масса теплоносителя M , равная массе теплоносителя, заключенного в объеме ГП между сечениями S_r и S_x . Массу M в общем случае можно представить в виде интеграла по этому объему:

$$M = \int_V \rho dV, \quad (2)$$

где ρ — функция, описывающая изменение плотности теплоносителя в ГП; V — объем ГП между поперечными сечениями трубопровода S_r и S_x .

Таким образом, для массового расхода теплоносителя в ГП (в соответствии с его определением) можно записать:

$$G_p = \frac{M}{t_{mp}} = \frac{\lambda M}{\ln(a_r / a_x)}, \quad (3)$$

где G_p — массовый расход теплоносителя в ГП; индекс «р» здесь и далее означает принадлежность величины к радиационному способу измерения.

В этой формуле выражена сущность метода: зная отношение удельных активностей изотопа ^{16}N для двух участков трубопровода ГП и массу теплоносителя, заключенного между этими участками, можно определить массовый расход теплоносителя в ГП. Тот факт, что достаточно знать именно отношение удельных активностей, а не абсолютные их значения для каждого участка трубопровода, имеет принципиально важное значение, в дальнейшем будет показано, что это существенно упрощает практическую реализацию метода.

Следующая задача, которую необходимо решить, — связать значения удельных активностей изотопа ^{16}N с характеристиками поля γ -излучения в соответствующих точках детектирования.

Связь эту можно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_r &= k a_r \rho_r J_r(\rho_r) \\ \varphi_x &= k a_x \rho_x J_x(\rho_x) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где k — размерная константа пропорциональности, характерная для изотопа ^{16}N ; φ_r, φ_x — плотность потока γ -квантов в точках детектирования H_r и H_x , обусловленная активностью изотопа ^{16}N , содержащегося в объемах теплоносителя ΔV_r и ΔV_x соответственно; $J_r(\rho_r), J_x(\rho_x)$ — функция ослабления источника в зависимости от плотности теплоносителя для точек детектирования H_r и H_x соответственно (под источником в данном случае подразумевается теплоноситель, заключенный в объеме трубопровода ΔV_r или ΔV_x с равномерно распределенным в нем изотопом ^{16}N).

Функция ослабления источника в общем случае зависит от конкретной геометрии регистрации излучения (т. е. от взаимного расположения источника и детектора), от энергии γ -квантов, а также от ослабляющих свойств материалов (в том числе и теплоносителя), через которые проходит излучение от источника, прежде чем попадает в детектор. Сложная геометрия не позволяет представить эту функцию в простом аналитическом виде, ее значение можно с достаточной точностью рассчитать по стандартным программам для расчета поля излучения от объемных источников. Следует иметь в виду, что функцию ослабления рассчитывают для некоторой идеальной (проектной) геометрии.

Естественно, что реальная геометрия всегда в какой-то степени отличается от проектной. Соответственно и реальная функция ослабления будет отличаться от расчетной. Если отличие реальной геометрии от проектной невелико (как правило, это условие выполняется), тогда, полагая, что проектная геометрия одинакова для горячей и холодной ниток ГП, можно записать:

$$\left. \begin{aligned} J_r(\rho_r) &= J_0(\rho_r) f_r \\ J_x(\rho_x) &= J_0(\rho_x) f_x \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $J_0(\rho)$ — проектная функция ослабления источника в зависимости от плотности теплоносителя; f_r, f_x — коэффициенты, учитывающие отклонение реальной геометрии от проектной для точек детектирования H_r и H_x соответственно. С учетом (5) преобразуем выражение (4) и введем обозначения:

$$\left. \begin{aligned} A_r &= k f_r a_r = \varphi_r / \rho_r J_0(\rho_r) \\ A_x &= k f_x a_x = \varphi_x / \rho_x J_0(\rho_x) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Физический смысл величин A_r и A_x достаточно очевиден: это относительные удельные активности изотопа ^{16}N в горячей и холодной нитках ГП (в объемах трубопровода ΔV_r и ΔV_x).

Подставляя (6) в (3), получаем окончательное выражение для массового расхода теплоносителя первого контура:

$$G_p = \frac{\lambda M}{\ln(A_r / A_x) + \ln(f_x / f_r)}$$

или

$$G_p = \frac{\lambda M}{\ln(A_r / A_x) + X} \quad (7)$$

где $X = \ln(f_x / f_r)$ — поправка на неидентичность геометрии регистрации γ -излучения двумя датчиками, установленными на горячей и холодной нитках ГП (коэффициент неидентичности).

Из полученного выражения следует, что существует принципиальная возможность измерения расхода теплоносителя первого контура радиационным методом без предварительной калибровки. Очевидно, это возможно в случае соблюдения строгой идентичности геометрии регистрации двумя датчиками, установленными на ГП, т. е. при условии $f_r = f_x$ ($X = 0$). Именно в этом смысле рассматриваемый метод измерения расхода классифицируют как абсолютный.

Однако при реализации радиационного метода на энергоблоке с ВВЭР гарантировать строгое соблюдение этого условия практически невозможно. В этом случае неучет величины X в формуле (7) может привести к значительным систематическим погрешностям при измерении расхода теплоносителя. Оценки, выполненные для ВВЭР-440 и ВВЭР-1000, показали, что коэффициент неидентичности X может достигать $\pm 0,08$, а соответствующая систематическая погрешность определения расхода может доходить до $+15\%$. В отдельных случаях, например, при грубых нарушениях технологии изготовления или монтажа датчиков, приводящих к существенным отклонениям реальной геометрии от проектной, систематическая погрешность может быть больше. Для исключения систематических погрешностей необходима абсолютная калибровка, которая заключается в определении коэффициентов неидентичности для каждой ГП.

2. Петлевой датчик системы АИРМ.

Петлевой датчик (ПД) используют в системе АИРМ, во-первых, для измерения тепловой мощности реактора или ГП, и в этом случае его рассматривают как датчик подсистемы ПД в рамках системы АИРМ; во-вторых, для измерения расхода теплоносителя первого контура по спаду активности изотопа ^{16}N в ГП — и тогда его рассматривают как датчик подсистемы, называемой в дальнейшем радиационным измерителем расхода (ИР). В то же время собственно ПД представляет собой довольно сложное механическое устройство, предназначенное для обеспечения установки детекторов (гамма-счетчиков) системы АИРМ вблизи прямолинейных участков трубопровода первого контура; требуемой геометрии регистрации γ -излучения от ограниченных участков трубопровода; подавления фона от посторонних источников γ -излучения; охлаждения детекторов системы АИРМ.

Вариант ПД для реактора типа ВВЭР-440, установленный и испытанный в составе системы АИРМ на I энергоблоке Армянской АЭС, имеет одну особенность — наличие транспортного канала, позволяющего осуществлять замену детекторов (в случае выхода из строя) из полуобслуживаемого помещения. Это устройство послужило прототипом при разработке ПД для реактора типа ВВЭР-1000. Первоначальный вариант конструкции датчика (рис 51), так же как конструкция датчика на ВВЭР-440, имела транспортный канал, дополненный специально разработанным механизмом доставки блока детектирования в рабочее положение.

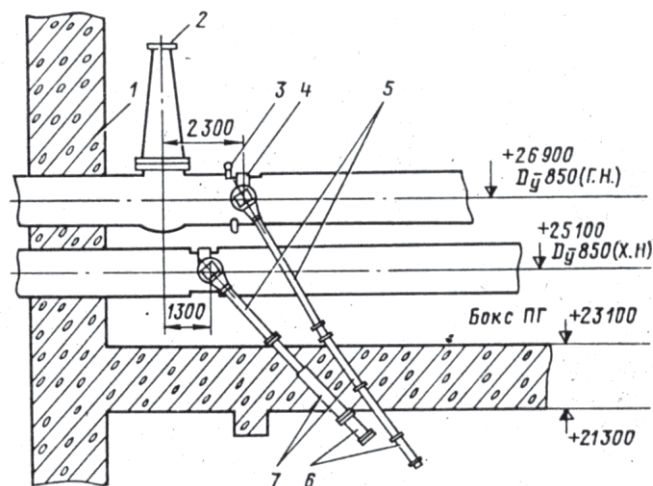


Рис. 51. Расположение ПД на ЮУАЭС и КЛНАЭС с реакторной установкой ВВЭР-1000: 1 — биологическая защита; 2 — главная запорная задвижка; 3 — система охлаждения ПД; 4 — коллиматор ПД; 5 — транспортный канал ПД; 6 — механизм перемещения; 7 — закладная труба.

Однако в условиях ВВЭР-1000 применение системы доставки на базе транспортного канала себя не оправдало. Прежде всего потому, что ее эксплуатация была затруднена необходимостью доступа в помещения, находящиеся в пределах герметичной защитной оболочки. Поэтому в окончательном варианте ПД от системы доставки пришлось отказаться, проблема замены неисправных гамма-счетчиков в датчиках была решена в результате применения специального блока детектирования, позволяющего устанавливать на ГП кроме рабочего счетчика еще 2—4 резервных.

В конструкции этот вариант ПД (рис. 52 и 53) по функциональному назначению можно условно выделить следующие основные узлы: блок детектирования; холодильник; защитный коллиматор; узел крепления коллиматора; узел ориентации коллиматора.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

Блок детектирования (см. рис. 53) предназначен для установки гамма-счетчиков системы АИРМ и схемы их включения. Его конструкция обеспечивает установку в одном корпусе четырех гамма-счетчиков: трех основных (типа СИ-34Г или СИ-40Г); одного вспомогательного (типа СИ-19Г или СИ-39Г).

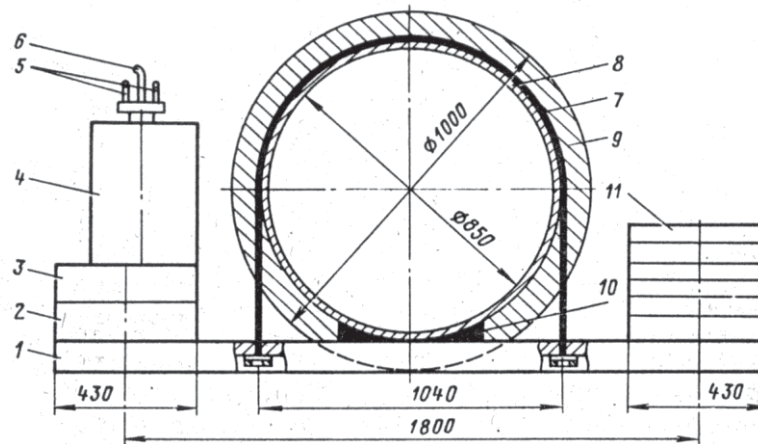


Рис. 52. Расположение ПД на Ду-850 АЭС с ВВЭР-1000

1 — опора; 2 — подставка; 3 — узел ориентации; 4 — коллиматор; 5 — патрубки охлаждения; 6 — сигнальный кабель; 7 — хомут; 8 — трубопровод Ду-850; 9 — теплоизоляция; 10 — фиксаторы; 11 — противовес

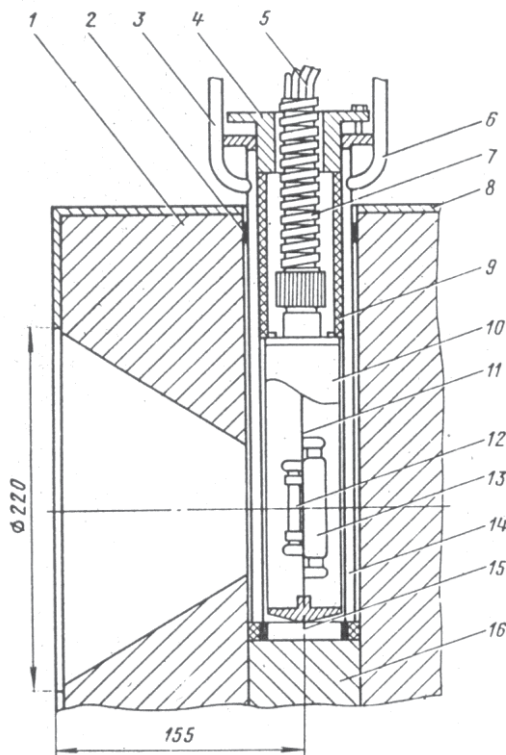


Рис. 53. Конструкция ПД:

1 — защитный свинцовый коллиматор; 2 — кольцо (центрирующее); 3, 6 — патрубки системы охлаждения; 4 — втулка; 5 — коаксиальный кабель (4 шт.); 7 — металлорукав; 8 — стальная оболочка коллиматора; 9 — вкладыш; 10 — блок детектирования; 11 — монтажная плата; 12 — основной гамма-счетчик (СИ-40Г или СИ-34Г — 3 шт.); 13 — вспомогательный гамма-счетчик (СИ-19Г или СИ-39Г — 1 шт.); 14 — холодильник; 15 — фиксатор; 16 — пробка

Счетчики при помощи пружинных контактов установлены на изолированной от корпуса текстолитовой плате, причем все три основных счетчика размещены таким образом, что их геометрические оси симметрии находятся в одной плоскости и параллельны друг другу. Центральный счетчик принято считать рабочим, расположенные по бокам от него — резервными. Вспомогательный счетчик расположен по другую (по отношению к основным счетчикам) сторону платы. По сравнению с основными счетчиками он примерно на два порядка чувствительнее и позволяет регистрировать γ -излучение от трубопровода на малых уровнях мощности реактора. Плата с установленными на ней счетчиками размещается в тонкостенном стальном корпусе, внутренняя полость которого уплотняется фланцем при помощи прокладки и винтов. Фланец имеет герметизированную проходку для вывода четырех (по числу счетчиков) кабельных линий связи, соединенных с линиями связи системы АИРМ с помощью высокочастотных разъемов.

Холодильник (см. рис. 53) предназначен для охлаждения блока детектирования до рабочей температуры счетчиков и представляет собой теплообменник типа труба в трубе, имеющий входной и выходной патрубки для осуществления принудительной циркуляции охлаждающей воды от магистрали промконтра АЭС. Во внутренней трубке холодильника размещается блок детектирования.

Причем наличие специального фиксатора в нижней части холодильника обеспечивает однозначное расположение блока детектирования в рабочем положении, соответствующем проектной геометрии.

Защитный коллиматор (см. рис. 53) предназначен для подавления фона от посторонних источников γ -излучения и обеспечения регистрации γ -излучения детекторами системы АИРМ от определенных строго фиксированных участков трубопровода первого контура. Он представляет собой изготовленный из свинца контейнер, имеющий коническое коллимационное отверстие. Во внутренней полости коллиматора устанавливается и закрепляется холодильник с блоком детектирования таким образом, чтобы чувствительный объем рабочего счетчика находился на оси коллимационного отверстия. Снаружи коллиматор покрыт стальной оболочкой, предохраняющей его от повреждения при монтаже и эксплуатации. Кроме того, коллиматор имеет специальную щелевую насадку, позволяющую изменять профиль коллимационного отверстия при проведении с помощью системы АИРМ исследований флюктуации активности теплоносителя, первого контура.

Узел крепления (см. рис. 52) предназначен для жесткой установки коллиматора вблизи прямолинейного участка трубопровода. Он представляет собой сборную металлическую площадку, закрепляемую на трубопроводе при помощи гибких ленточных хомутов. Площадка имеет два плеча, на одном из которых на специальной подставке закрепляется коллиматор. На противоположном плече устанавливается противовес, уравнивающий тяжесть коллиматора и предотвращающий поворот его вместе с площадкой относительно трубопровода. Все элементы узла крепления, имеющие непосредственный контакт с трубопроводом, изготовлены из однородной с ним стали.

Узел ориентации (на рис. 52 условно обозначен в виде прямоугольника) предназначен для окончательной, точной установки коллиматора с целью компенсации отклонений его положения от проектной геометрии, которые могут возникнуть при монтаже. Для этого конструкция узла ориентации обеспечивает определенный диапазон регулирования положения коллиматора со следующими степенями свободы: линейное перемещение по вертикали ± 30 мм; линейное перемещение по горизонтали вдоль оси коллимационного отверстия ± 30 мм; угловое перемещение относительно, оси рабочего счетчика $\pm 5^\circ$; угловое перемещение относительно горизонтальной оси, проходящей через чувствительные объемы основных счетчиков, $\pm 5^\circ$.

Перемещение коллиматора осуществляется при помощи системы регулирующих винтов. Предусмотрена возможность жесткой фиксации коллиматора в любом положении в пределах диапазона регулирования. В состав узла ориентации входит также съемное устройство (шаблон), позволяющее контролировать расстояние от поверхности трубопровода до счетчика.

Система АИРМ предусматривает установку двух ПД на каждой ГП. В соответствии с требованиями, они должны размещаться вблизи прямолинейных участков трубопровода на максимально возможном вдоль контура ГП расстоянии. На рис. 51 показано размещение ПД на ГП реактора типа ВВЭР-1000, удовлетворяющее этим требованиям. Аналогичным образом установлены ПД и на остальных ГП. При таком расположении время транспорта от одного ПД до другого составляет 6 — 7 с (для номинального расхода теплоносителя). Для обеспечения удобства и безопасности при обслуживании ПД (замена счетчиков, ориентация и т. п.) в местах их установки имеются стационарные площадки обслуживания.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

Заключение

В ходе работы были рассмотрены различные способы измерения расхода теплоносителя на энергетических установках и отдельно на ЯЭУ. Подробно описаны те из них, которые в настоящее время широко используются на энергетических предприятиях. Описаны физические основы действия каждого типа расходомеров. Приведены примеры конкретных расходомеров с описанием принципа их действия. Так же был проведен сравнительный анализ различных видов расходомеров, где описаны достоинства и недостатки каждого из них. На основе этого можно сделать вывод, что расходомеры постоянно совершенствуются и появляются новые типы. Следовательно, необходимо внедрять в производство все новые разработки и делать их более доступными по цене, т.к. точное измерение расхода на энергетическом предприятии крайне необходимо для его надежного функционирования. Необходимо применять дублирование расходомеров на некоторых участках трубопроводов, для уменьшения погрешности расхода.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

НГТУ – 070500 – (М08 – АЭ – 2) – Р

Лист

64

Список литературы

1. Кремлевский П. П.

Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник:

Кн. 1. – 5-е изд. перераб. и доп. –

СПб.: Политехника, 2002. – 409 с.

2. С.А. Агапов, В.В. Лысенко, А.И. Мусорин, С.Г. Цыпин

Радиационные методы измерения параметров ВВЭР. –

М.: Энергоатомиздат, 1991. – 136 с.: ил.

3. Дунцев А.В.

Лекции по курсу: теплофизические измерения. – 2008.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

НГТУ – 070500 – (М08 – АЭ – 2) – Р

Лист

65