

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет)
Механико-технологический институт
Кафедра «Гидравлика и гидропневмосистемы»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, должность

_____/_____/

« ____ » _____ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой,

д.т.н., профессор

_____/ Спиридонов Е.К. /

« ____ » _____ 2017 г.

Влияние режимов наполнения на точность измерения производительности

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ЮУрГУ – 15.04.02.2017.007.ВКР

Руководитель, ст.пр.

_____/ Лайко К.К. /

« ____ » _____ 2017 г.

Автор

студент группы П-266

_____/ Соснина З.С. /

« ____ » _____ 2017 г.

Нормоконтролер, доцент

_____/ Подзерко А.В

« ____ » _____ 2017 г.

Челябинск 2017

АННОТАЦИЯ

Соснина З.С. Влияние режимов наполнения ресивера на точность измерения производительности. – Челябинск: ЮУрГУ, П – 266, 74 с., 31 ил., 13 табл., библиогр. список – 29 наим., 1 прил., 14 л. плакатов ф. А4.

Объектом данного исследования является способ измерения производительности винтового компрессора.

Предметом данного исследования является стенд для измерения производительности винтового компрессора.

Цель работы – выявить оптимальный режим наполнения ресивера для получения высокой точности измерения производительности.

Для достижения цели работы были решены следующие задачи:

1. Анализ существующих методов измерения производительности;
2. Определение современных методов, действующих на производстве и испытательных центрах;
3. Сопоставление современного метода измерения производительности вихревым расходомером с режимами наполнения ресивера.

Результаты выпускной квалификационной работы имеют практическую значимость и внедрены в производственный процесс ООО «Челябинского компрессорного завода».

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	10
1 ОБЗОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА	12
Постановка задачи исследования	39
2 ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ	40
2.1 Схема установки для измерения производительности ресивером ...	40
2.2 Вывод формулы для расчета производительности	41
2.3 Описание режимов и контролируемых параметров	48
2.3.1 Режим 1.....	48
2.3.2 Режим 2.....	49
2.3.3 Режим 3.....	50
2.3.4 Режим 4.....	52
2.3.5 Режим 5.....	53
2.4 Контрольные измерения с помощью расходомера	55
Выводы по разделу	57
3 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	58
3.1 Технические характеристики компрессорных установок	58
3.1.1 Агрегат компрессорный винтовой АКВ-0,81/1	58
3.1.2 Компрессор винтовой КВ-10/8.....	60
3.2 Пример расчета производительности для режима 5	62
3.3 Результаты испытаний.....	63
3.4 Анализ влияния человеческого фактора.....	68
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	71
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	73
ПРИЛОЖЕНИЕ А	76

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день, с развитием науки и техники, растут и требования к качеству показателей машин. Особое значение потребителя компрессорной техники придается объемной производительности. Однако, далеко не все потребители имеют возможность приобрести, освоить и обслуживать дорогостоящие расходомерные приборы, но подавляющее большинство имеют в составе компрессорных станций воздухохранилища и ресиверы с помощью которых также можно измерить производительность. Этот способ весьма экономичен, однако, имеет ряд особенностей к тому, что измеренная производительность может очень сильно отличаться от истинной величины. Для производителей компрессорных станций важно, чтобы производительность была измерена потребителем правильно, что требует анализа возможных режимов наполнения ресивера и поиска оптимального из них. Путем сравнения полученной производительности с контрольной по расходомеру

Объектом данного исследования является способ измерения производительности винтового компрессора.

Предметом данного исследования является стенд для измерения производительности винтового компрессора.

Цель работы – выявить оптимальный режим наполнения ресивера для получения высокой точности измерения производительности.

Для достижения цели работы были решены следующие задачи:

4. Анализ существующих методов измерения производительности;
5. Определение современных методов, действующих на производстве и испытательных центрах;
6. Сопоставление современного метода измерения производительности вихревым расходомером с режимами наполнения ресивера.

Исключение разночтений в вычислениях производительности и, следовательно, разногласий между производителем, делает задачу изучения режимов практически значимой и актуальной.

Результаты выпускной квалификационной работы имеют практическую значимость и внедрены в производственный процесс ООО «Челябинского компрессорного завода».

1 ОБЗОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА

Количество вещества, проходящее в единицу времени по трубопроводу, каналу и т.п., называется расходом вещества. Измерения расхода составляют до 15% от общего числа измерений в промышленности. Информация о расходе широко используется при управлении технологическими процессами для оптимизации их режимов. В последнее время возрастает роль измерений расхода энергоносителей в связи с возрастанием их стоимости и необходимостью контроля эффективности энергосберегающих мероприятий. В зависимости от единицы измерения количества вещества (м^3 или кг) различают массовый (кг/с) или объемный расходы ($\text{м}^3/\text{с}$). В технике часто применяют производные внесистемные единицы – $\text{м}^3/\text{ч}$, т/ч, л/с и др. Приборы, измеряющие расход вещества, называют расходомерами. Приборы, измеряющие количество вещества, протекающее через данное сечение трубопровода за некоторый промежуток времени, называют счетчиками количества. При этом количество вещества определяется как разность двух последовательных показаний счетчика в начале и конце этого промежутка времени. Показания счетчика выражаются в единицах объема, реже — в единицах массы. Прибор, одновременно измеряющий расход и количество вещества, называют расходомером со счетчиком. Расходомер измеряет текущее значение расхода, а счетчик выполняет интегрирование текущих значений расхода. Граница между счетчиками и расходомерами условна. Расходомеры оснащают средствами для определения количества жидкости или газа, а счетчики — средствами для определения расхода, что позволяет объединить счетчики и расходомеры в одну группу приборов — расходомеры.

Устройство (диафрагма, сопло, напорная трубка), непосредственно воспринимающее измеряемый расход и преобразующее его в другую величину, удобную для измерения (например, в перепад давления), называют преобразователем расхода. В зависимости от рода измеряемого вещества они делятся на расходомеры воды, газа, пара и т.д. Они регистрируют скорость и расход жидкого или газообразного вещества за заданный период времени. На практике известно несколько методов определения расхода.

- Единицами измерения расхода являются: единица объёма в единицу времени и единица массы в единицу времени.
- Единица объёма в единицу времени: м³/с, м³/ч, м³/сутки и др.
- Единица массы в единицу времени: кг/с, кг/ч, г/с и др.

Методы измерения расхода:

На сегодняшний день существует значительное число методов измерений расхода и разновидностей приборов, рассмотрим некоторые из них:

1. Измерение расхода по перепаду давлений на сужающем устройстве

При измерении расхода методом переменного перепада давления в трубопроводе, по которому протекает среда, устанавливают сужающее устройство. Отверстие или горловина сужающего устройства - это круглое отверстие в сужающем устройстве, имеющее минимальное поперечное сечение, соосное измерительному трубопроводу. Из-за перехода части потенциальной энергии потока в кинетическую среднюю скорость потока в суженном сечении повышается. В результате статическое давление в этом сечении становится меньше статического давления перед сужающим устройством. Разность этих давлений тем больше, чем больше расход протекающей среды, и, следовательно, эта разность может служить мерой расхода. Таким образом, перепад давления на сужающем устройстве – разность между статическими давлениями среды, измеренными через отверстия для отбора давления перед и за сужающим устройством, если они расположены на одной высоте. Если отверстия для отбора давления расположены на разных высотах, то учитывают и статическое давление, обусловленное разностью высот расположения этих отверстий.

Перепад давления на сужающем устройстве (рисунок 1.1) равен

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad (1.1)$$

где p_1 – давление на входе в сужающее устройство;

p_2 – давление на выходе из сужающего устройства.

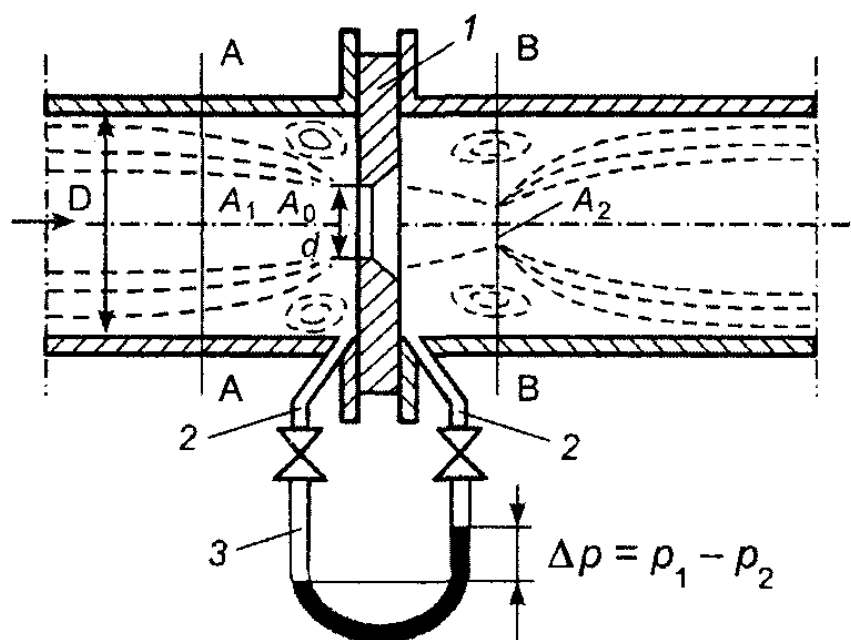


Рисунок 1.1 – Структура потока проходящего через диафрагму

На рисунке 1.1 указаны цифрами следующие элементы: 1 – сужающее устройство (диафрагма), 2- импульсные трубки, 3 – u - образный дифманометр. Сечения А-А – сечение потока вещества, в котором не сказывается возмущающее воздействие диафрагмы и В-В – сечение потока вещества в месте его наибольшего сжатия.

Устанавливать диафрагму в трубопроводе надо так, чтобы центр ее отверстия находился на оси трубопровода (рисунок 1.1). Сужение потока начинается до диафрагмы, на некотором расстоянии за диафрагмой поток достигает своего минимального сечения. Затем поток постепенно расширяется до полного сечения.

Условия, при соблюдении которых возможно измерение расхода вещества методом переменного перепада давления:

- поток вещества заполняет все поперечное сечение трубопровода;
- поток вещества в трубопроводе является практически установившимся;
- фазовое состояние вещества, протекающего через сужающее устройство, не изменяется (жидкость не испаряется; газы, растворенные в жидкости, не десорбируются; пар не конденсируется).

Рассмотрим, как распределяется статическое давление p вблизи диафрагмы по длине трубопровода l (рисунок 1.2).

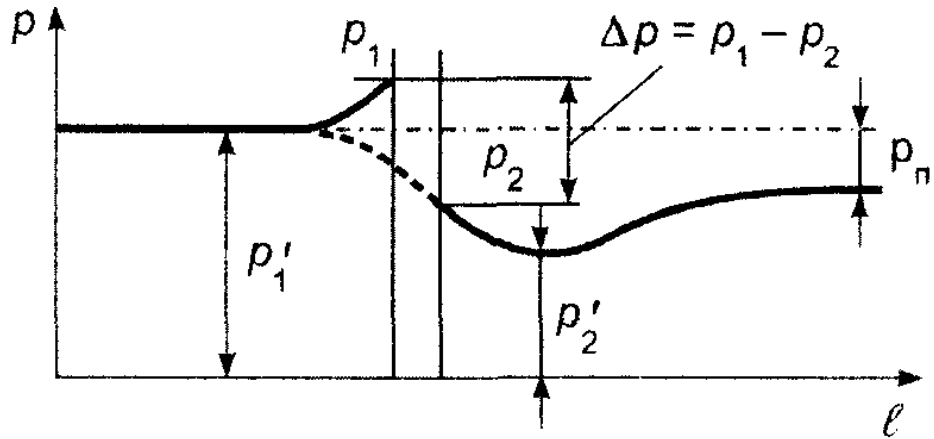


Рисунок 1.2 – Распределение статистического давления p вблизи диафрагмы

На рисунке 1.2 изображено распределение давлений вдоль стенки трубопровода (сплошная линия), а также распределение давлений по оси трубопровода (штрихпунктирная линия). Давление потока около стенок трубопровода после сужающего устройства не достигает своего прежнего значения на величину – безвозвратной потери, обусловленной завихрениями, ударом и трением, потому как затрачивается значительная часть энергии.

Отбор статических давлений p_1 и p_2 возможен с помощью соединительных импульсных трубок 2, вставленных в отверстия, расположенные до и после диафрагмы (рисунок 1.1), а измерение перепада давления производится с помощью U-образного дифманометра 3).

Также, в качестве сужающих устройств для измерения расхода жидкостей, газов, пара широко применяются стандартные сужающие устройства. К ним относят стандартную диафрагму, сопло ИСА 1932, трубу Вентури и сопло Вентури.

Стандартная диафрагма (далее — диафрагма) — диск с круглым отверстием, имеющий острую прямоугольную входную кромку.

Сопло ИСА 1932 (далее — сопло) — сужающее устройство с круглым отверстием, имеющее на входе плавно сужающийся участок с профилем, образованным двумя сопрягающимися дугами, переходящий в цилиндрический участок на выходе, называемый горловиной (рисунок 1.3).

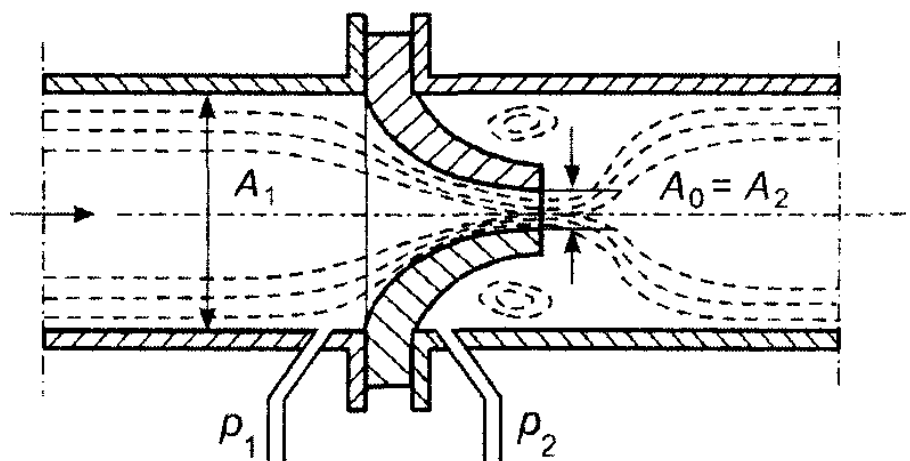


Рисунок 1.3 – Сопло

Сопло (рисунок 1.3) конструктивно изготавливается в виде насадки с круглым концентрическим отверстием, имеющим плавно сужающуюся часть на входе и развитую часть на выходе. Профиль сопла обеспечивает практически полное сжатие потока вещества и поэтому площадь цилиндрического отверстия сопла может быть принята равной минимальному сечению потока, т. е.:

$$A_0 = A_2 \quad (1.2)$$

Характер распределения статического давления p в сопле по длине трубопровода l такой же, как и у диафрагмы. Отбор давлений p_1 и p_2 тем же образом, как и у диафрагмы, до и после сопла.

Расходомерная труба Вентури (далее — труба Вентури) — сужающее устройство с круглым отверстием, имеющее на входе конический сужающийся участок, переходящий в цилиндрический участок, соединенный на выходе с расширяющейся конической частью, называемой диффузором.

Сопло Вентури — труба Вентури с сужающимся входным участком в виде сопла ИСА 1932 (рисунок 1.4).

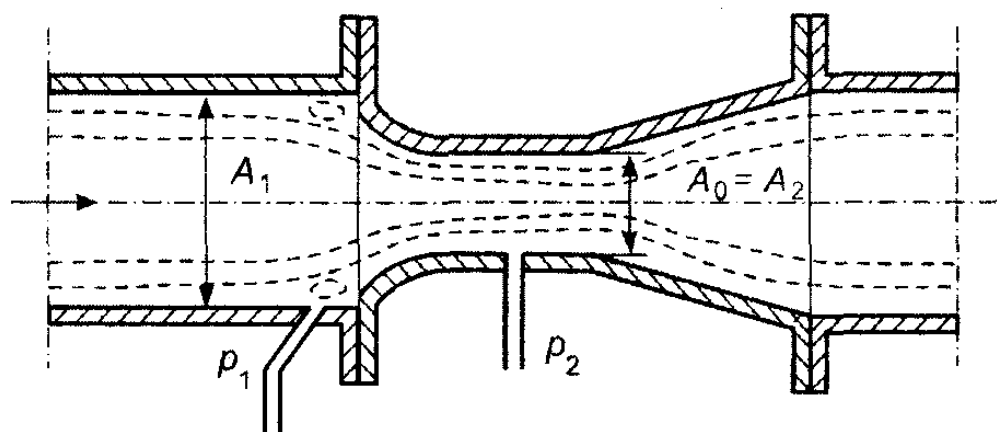


Рисунок 1.4 – Труба Вентури

Сопло Вентури (рисунок 1.4) конструктивно состоит из цилиндрического входного участка; плавно сужающейся части, переходящей в короткий цилиндрический участок; из расширяющейся конической части — диффузора. Сопло Вентури благодаря диффузору обладает меньшей потерей давления, чем диафрагма и сопло. Характер распределения статического давления p в сопле Вентури по длине трубопровода l такой же, как и у диафрагмы и сопла. Отбор давлений p_1 и p_2 осуществляется с помощью двух кольцевых камер, каждая из которых соединяется с внутренней полостью сопла Вентури группой равномерно расположенных по окружности отверстий.

Эти наиболее изученные средства измерения расхода и количества жидкостей, газа и пара могут применяться при любых давлениях и температурах измеряемой среды.

К достоинствам расходомеров следует отнести простоту конструкции преобразователя расхода и возможность поверки беспроливным методом, т. е. при отсутствии расходомерных стендов. Данная возможность обусловлена наличием наиболее полной научно-технической, в том числе стандартизованной информации по данному методу измерения.

Недостатками являются, во-первых, малый диапазон измерения (ранее не превышающий значения 1:3, а в настоящее время, с появлением многопредельных интеллектуальных датчиков давления, увеличившийся до 1:10). Во-вторых, высокая

чувствительность к неравномерности эпюры скоростей потока на входе в СУ, обусловленной наличием в подводящем и/или отводящем трубопроводах гидравлических сопротивлений (запорной арматуры, колен и т. д.). Данное обстоятельство определяет необходимость наличия перед указанными СУ прямых участков длиной не менее 10 диаметров условного прохода (D_u) трубопровода. В ряде случаев, например при установке СУ, после гидравлических сопротивлений, таких как не полностью открытый вентиль, прямой участок перед СУ достигает длины 50 D_u и более). А также к недостаткам измерения расхода по методу переменного перепада давления относят значительные потери давления; износ входной кромки диафрагмы; большие длины прямых участков трубопроводов перед СУ.

2. Измерение расхода с помощью напорных трубок

Напорными трубками называют устройства для измерения величины и направления скорости, а также расхода жидкости или газа, действие которых основано на измерении давления в потоке.

При измерении расхода с помощью напорных трубок, как и при измерении расхода с помощью сужающих устройств, используется метод переменного перепада давлений.

Напорные трубки применяют для измерения скорости и давления в потоках, а также для измерения скоростей в пограничных слоях при экспериментальных исследованиях, как в лабораторных, так и в производственных условиях. Они используются также для измерения расхода жидкостей и газов при исследованиях, испытаниях и в ряде других случаев.

Измерение скорости в потоке жидкости или газа напорными трубками сводится к измерению динамического давления (скоростного напора), которое равно разности полного и статического давлений и связано со скоростью соотношением, получаемым из уравнения Бернулли:

$$p_{\Pi} - p_c = \frac{\rho v^2}{2} \quad (1.3)$$

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_{\Pi} - p_c)} \quad (1.4)$$

где v – скорость движения газа или жидкости, м/с;

ρ – плотность жидкости или газа в рабочих условиях, кг/м³;

p_{Π} – полное давление в лобовой точке напорной трубки, называемой критической, Па;

p_c – статическое давление или гидродинамическое давление в невозмущенном потоке, Па.

Таким образом, для определения динамического давления $\frac{\rho v^2}{2}$, а, следовательно, и скорости в данной точке потока необходимо измерить разность полного и статического давлений. Измерение полного давления может быть осуществлено напорной трубкой с отверстием на лобовом ее конце (в критической точке), установленной навстречу движению потока, а статическое давление — через одно или несколько отверстий в стенке трубы (рисунок 1.5)

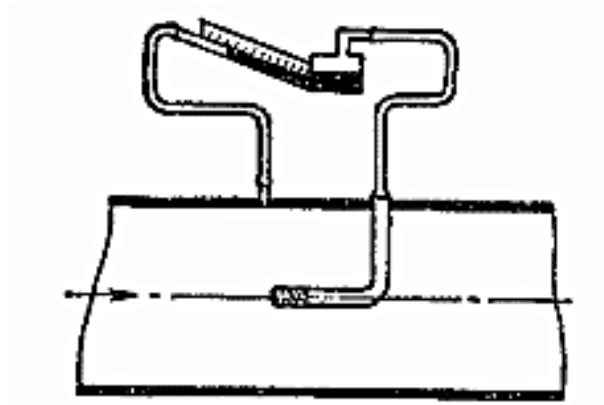


Рисунок 1.5 – Измерение динамического давления

Так как для определения скорости в данной точке потока нужно измерить только разность давлений $p_{\Pi} - p_c$ то обе трубки следует присоединить к микроманометру или жидкостному дифманометру. В уравнение 1.4 входит плотность среды, которую необходимо определить для рабочих условий с максимально возможной точностью.

Рассмотренный метод впервые был применен в 1732 г. Пито для измерения скорости в потоке воды, поэтому напорную трубку, схематично показанную на рисунке 1.6, называют трубкой Пито.

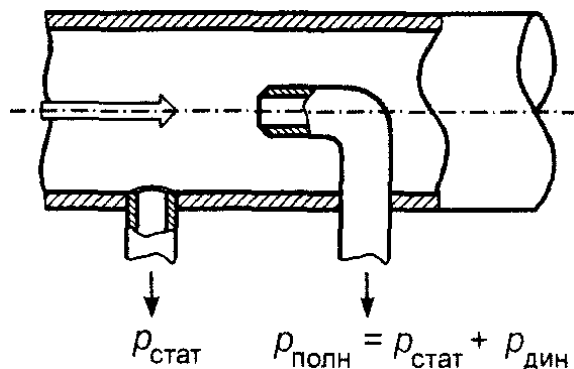


Рисунок 1.6 – Схема трубки Пито

Трубка Пито — Г-образная трубка для измерения динамического напора текущих жидкости или газа. Трубка датчика вводится через стенку основного трубопровода и направляется своим отверстием непосредственно навстречу потоку жидкости или газа (рисунок 1.6).

Напорная трубка Прандтля (называемая также трубкой Пито— Прандтля, а иногда — трубкой Пито) позволяет одновременно измерять как полное, так и статическое давление в контролируемом потоке. Она представляет собой цилиндрическую трубку с полусферическим носиком, ось которой устанавливается вдоль потока. Через центральное отверстие на полусфере (критическая точка) измеряется полное давление $p_{\text{полн}}$; другое отверстие (или ряд отверстий) располагается на боковой поверхности трубки на расстоянии нескольких диаметров трубки от носика и служит для измерения статического давления $p_{\text{стат}}$. Геометрическая форма трубки Прандтля, форма отверстий и расстояние от них до носика трубки выбираются так, чтобы давление в боковых отверстиях по возможности мало отличалось от статического давления в исследуемой точке потока.

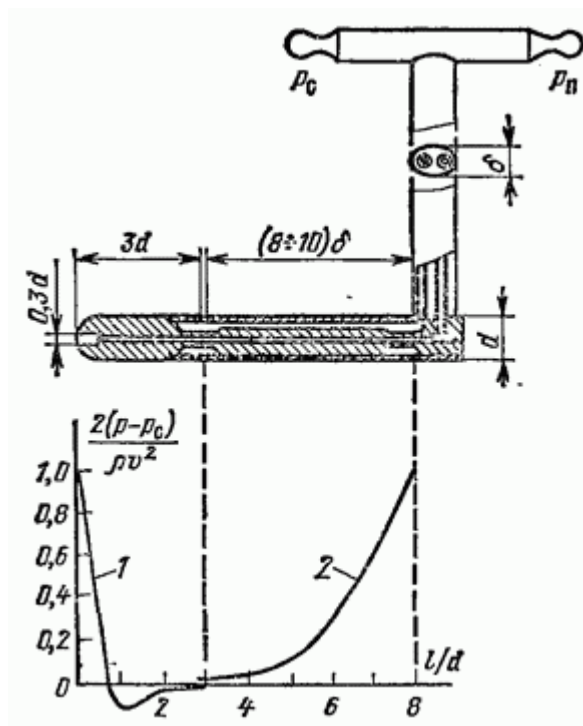


Рисунок 1.7 – Дифференциальная трубка Пито

Напорные трубки аннубар (annubar)

Данные напорные трубки вставляются по диаметру трубы в протекающий поток. Отверстия расположены на двух сторонах трубки аннубар, как против течения, так и по нему. Эти отверстия соединены со сдвоенными усредняющими камерами. Число отверстий пропорционально диаметру трубы. Давление в камере, соединенной с отверстиями, направленными против течения, соответствует среднему значению скоростного напора. Давление в камере, соединенной с отверстиями, направленными по течению, соответствует среднему опорному давлению. Их разность дает точный и стабильный сигнал перепада давления, который пропорционален расходу.

3. Расходомеры постоянного перепада давления

Расходомеры постоянного перепада давления относят к средствам измерения, называемым расходомерами обтекания. Принцип их действия основан на зависимости перемещения тела, воспринимающего динамическое давление обтекающего

его потока, от расхода вещества. Предназначены для измерения плавно меняющегося объемного расхода однородных потоков чистых и слабо загрязненных жидкостей и газов.

Простейшим и наиболее распространенным прибором постоянного перепада давления является ротаметр, предназначенный для измерения плавно меняющегося объемного расхода однородных потоков чистых и слабо загрязненных жидкостей и газов. Его действие основано на измерении вертикального перемещения чувствительного элемента (тела), зависящего от расхода среды и приводящего одновременно к изменению площади проходного сечения отверстия таким образом, чтобы перепад давления на чувствительном элементе остался постоянным. Противодействующая сила в расходомерах данного типа — сила тяжести чувствительного элемента, изготавливаемого в виде поплавка (или поршня).

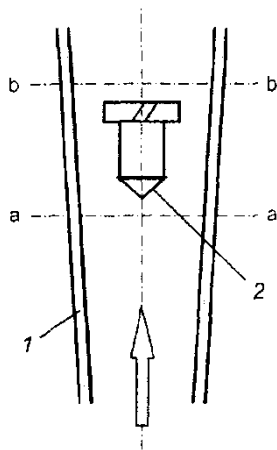


Рисунок 1.8 – Схема ротаметра

Ротаметр (рисунок 1.8) состоит из вертикальной конусной стеклянной трубки 1, внутри которой находится чувствительный элемент 2 — поплавок. Верхний его обод снабжен каналами с крутым наклоном. Под действием потока жидкости или газа поплавок вертикально перемещается и одновременно приходит во вращательное движение и центрируется в центре потока. При этом изменяется площадь кольцевого зазора между поплавком и внутренними стенками трубки. Перепад давления на поплавке определяется его массой. При постоянной массе поплавок площадь

кольцевого зазора между поплавком и внутренними стенками трубки пропорциональна расходу вещества, протекающего по трубке. По перемещению поплавка ротаметра вдоль его шкалы, нанесенной на конусной стеклянной трубке, судят об объемном расходе в единицу времени (л/ч, м³/ч). [3]

Итак, представим, что поплавок под действием потока вещества поднялся на некоторую высоту в ротаметре и остановился во взвешенном состоянии в измеряемой среде. Рассмотрим силы, действующие на поплавок ротаметра. В положении равновесия сила, создаваемая измеряемой средой, протекающей через ротаметр и действующей снизу, уравнивается силой, создаваемой массой поплавка, и силой, действующей сверху. Масса поплавка m (в кг) при полном погружении его в измеряемую среду определяется как

$$m = V_{\text{п}}(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{с}}) \quad (1.5)$$

где $V_{\text{п}}$ – объем поплавка;

$\rho_{\text{п}}$ и $\rho_{\text{с}}$ – плотности материала, из которого изготовлен поплавок, и среды, протекающей через ротаметр, соответственно, кг/м³.

Пренебрегая силами трения, запишем равновесие сил:

$$V_{\text{п}}(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{с}})g = A_{\text{п}}(p_1 - p_2) \quad (1.6)$$

где $A_{\text{п}}$ – наибольшая площадь поперечного сечения поплавка, м²;

p_1 и p_2 – давления измеряемой среды до (снизу) и после (сверху) поплавка соответственно, Па;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

Теперь определим из формулы (1.6) перепад давления на поплавке Δp (Па) [3]

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{V_{\text{п}}(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{с}})g}{A_{\text{п}}} \quad (1.7)$$

Из полученного уравнения следует, что независимо от положения поплавка перепад давления на нем постоянен и не зависит от расхода измеряемой среды. Это объясняется постоянством скорости измеряемой среды при изменении ее расхода,

что обусловлено изменением площади кольцевого зазора, между поплавком и трубкой. Зависимость положения поплавка от величины измеряемого расхода линейна, поэтому шкала ротаметра равномерна.

Объемный расход жидкости и конструктивные параметры ротаметра связаны уравнением (1.8)

$$F_0 = \alpha A_k \sqrt{\frac{2gV_{\text{п}}(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{с}})}{\rho A_{\text{п}}}} \quad (1.8)$$

где A_k - площадь кольцевого зазора между поплавком и стенками ротаметра, м^2 ;

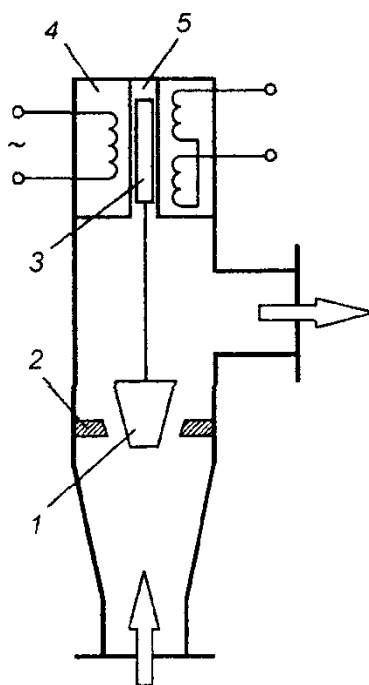


Рисунок 1.9 – Схема ротаметра с дифференциально-трансформаторным датчиком

Ротаметр, снабженный передающим преобразователем с электрическим выходным сигналом, показан на рисунок 1.9. Ротаметр имеет металлический корпус, конический поплавок 1, перемещаемый внутри кольцевой диафрагмы с коническим отверстием 2 под действием потока жидкости, проходящего снизу вверх. При подъеме поплавка проходное отверстие между рабочей поверхностью поплавка и внутренней кромкой диафрагмы увеличивается пропорционально измеряемому расходу

среды. Поплавок ротаметра жестко связан с сердечником 3 передающего дифференциально-трансформаторного преобразователя 4, надетого на разделительную трубку 5, изготовленную из немагнитной стали.

4. Объемные расходомеры и счетчики

4.1 Ротационные счетчики

Действие ротационных счетчиков основано на том, что гладкие роторы лемнисковатой формы под давлением измеряемого газа приходят в движение и при этом отмеривают определенные объемы газа (рисунок 1.10). [11]

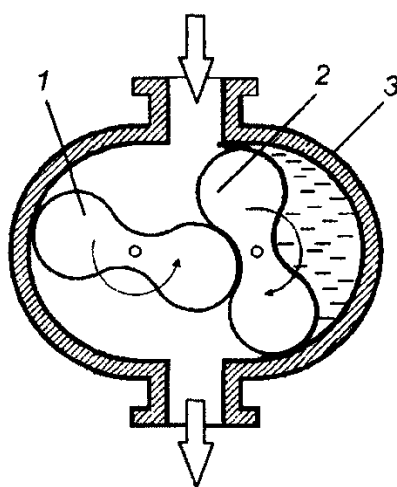


Рисунок 1.10 – Схема ротационного газового счетчика

Роторные преобразователи в основном устанавливают на газопроводах.

Выпускаются счетчики с электронным корректором, позволяющим получить результат измерений объема газа, приведенный к стандартным условиям. Ротационные счетчики монтируют как на горизонтальных, так и на вертикальных измерительных трубопроводах. Предпочтителен монтаж на вертикальных измерительных трубопроводах, особенно, для измерения количества загрязненного газа.

4.2 Скоростные счетчики

Скоростной метод положен в основу ряда расходомеров, обладающих значительным диапазоном и простым устройством.

Принцип действия скоростных расходомеров-счетчиков основан на измерении скорости вращения потоком (газа или жидкости) измерительной турбинки. Для

бесперебойной работы счетчиков необходимо отсутствие завихрений в потоке, поступающем на турбинку. Чувствительным элементом скоростных счетчиков является аксиальная или тангенциальная турбинка, приводимая во вращение потоком жидкости, протекающим через счетчик. Принцип действия скоростных счетчиков основан на том, что число оборотов турбинки в единицу времени n , пропорционально скорости потока, омывающего турбинку [14]:

$$n = kV \quad (1.9)$$

где k – коэффициент пропорциональности;

V – скорость потока в некотором сечении счетчика;

Достоинствами расходомеров являются малые габариты и вес, относительно низкие стоимость и чувствительность к пневмоударам, а также значительный диапазон измерения расхода (до 1:30), который существенно превосходит аналогичный показатель для СУ. К недостаткам следует отнести некоторую чувствительность к искажениям потока на входе и выходе расходомера (хотя в современных приборах требования к длинам прямых участков до и после прибора минимальные и составляют, соответственно, всего 2 и 1 Ду), неработоспособность на малых расходах - менее 8 - 10 м³/ч, а также повышенную погрешность при измерении пульсирующих потоков газа.

Однако самым главным достоинством расходомеров объемного и скоростного типа является стабильность коэффициента преобразования в самом широком диапазоне числа Рейнольдса Re потока газа. Обусловлено это тем, что все выпускаемые как у нас в стране, так и в мире счетчики газа калибруются на воздухе при нулевом избыточном давлении, в то время как работают на газе при совершенно других значениях давления.

Обеспечить достоверную сходимость показаний для этих двух случаев возможно только, если расходомер изначально имеет стабильный коэффициент преобразования, т. е. постоянное отношение его естественного выходного сигнала к проходящему через прибор расходу воздуха или газа. Например, для турбинного

или ротационного счетчика газа (после необходимых сокращений) данный коэффициент преобразования определяется как количество оборотов турбинки или роторов, соответствующее прохождению единицы объема газа.

Оппоненты могут возразить, что поскольку в узле учета газа кроме объемного расхода все равно необходимо измерять температуру и давление газа, то даже при отсутствии необходимой стабильности коэффициента преобразования у прибора всегда имеется возможность при проведении его калибровки линеаризовать его статическую характеристику. А при переходе к реальным условиям эксплуатации также внести соответствующие корректировки, рассчитав число Re для каждого случая измерения. Тем более что современная микроэлектроника позволяет решать и более сложные задачи при относительно небольших затратах.

Действительно, описанную выше задачу решить принципиально можно, но необходимо полностью сформулировать ее условия, а этого пока не удастся. Дело в том, что при течении газа по трубопроводу, а особенно при его расширении или сжатии (что имеет место, например, при повороте трубопровода или обтекании потоком каких-либо препятствий), имеют место сложные аэро- и термодинамические процессы. Соответственно, зависят они не только от величины числа Re , но и от значений других аэро- и термодинамических критериев, в частности, чисел Струхала St , Нусельта Nu , Фруда Fr . А для проведения коррекции с учетом этих значений, во-первых, отсутствует необходимый экспериментальный материал, а во-вторых, для их определения как минимум нужна непрерывная информация о составе газа, которая в случаях установки приборов учета газа у потребителей отсутствует.[1]

5. Измерение расхода на основе тепловых явлений

Тепловыми расходомерами называют расходомеры, действие которых основано на измерении эффекта теплового воздействия на поток (или на тело, контактирующее с потоком), зависящего от расхода. Чаще применяются для измерения расхода газа и реже для измерения расхода жидкости. Тепловые расходомеры отличаются способом нагревания, расположением нагревателя (снаружи технологического тру-

бопровода или внутри), а также характером функциональной связи между расходом и измеряемым сигналом. Основным способом нагрева — электрический омический. По характеру теплового взаимодействия тепловые расходомеры подразделяют на [13]:

- Калориметрические;
- Термоконвективные;
- Термоанемометрические.

5.1 Калориметрические расходомеры

Принцип работы калориметрических расходомеров основан на зависимости среднemasсовой разности температур потока от мощности нагрева. Калориметрический расходомер (рисунок 1.11) состоит из нагревателя 3, расположенного внутри трубопровода 4, и двух термопреобразователей 1 и 2 для измерения температур T_1 до нагревателя и T_2 после нагревателя. Термопреобразователи располагаются обычно на равных расстояниях $l_1 = l_2$ от нагревателя. Распределение температур по обе стороны от источника нагрева зависит от расхода вещества.

Так как теплоемкость у жидкостей намного больше, чем у газов, то калориметрические расходомеры находят применение лишь для измерения очень малых расходов жидкостей. Основное назначение этих приборов — измерение расхода газа. Из-за малой надежности работы в эксплуатационных условиях нагревателей и термопреобразователей, располагаемых внутри трубопровода, калориметрические расходомеры применяют как образцовые приборы для поверки и градуировки расходомеров других типов.

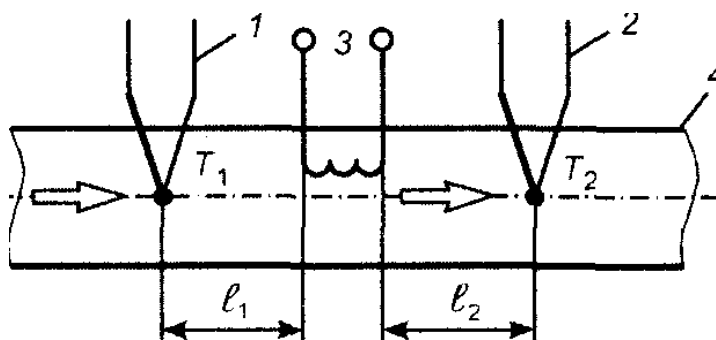


Рисунок 1.11 – Калориметрический расходомер

1,2 – термопреобразователи; 3 – нагреватель; 4 – трубопровод.

5.2 Термоконвективные расходомеры

Термоконвективными называются тепловые расходомеры, у которых и нагреватель, и термопреобразователь (термопара) располагаются снаружи трубопровода (рисунок 1.12). Это существенно повышает эксплуатационную надежность расходомеров и делает их удобными для применения. Передача теплоты от нагревателя к измеряемому веществу осуществляется через стенку трубы за счет конвекции.

Термоконвективные расходомеры, у которых нагреватель совмещен с термопреобразователями, обладают меньшей инерционностью.

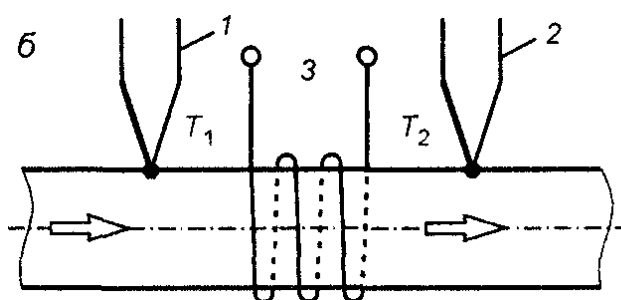


Рисунок 1.12 – Термоконвективный расходомер

1,2 – термопреобразователи; 3 – нагреватель; 4 – трубопровод.

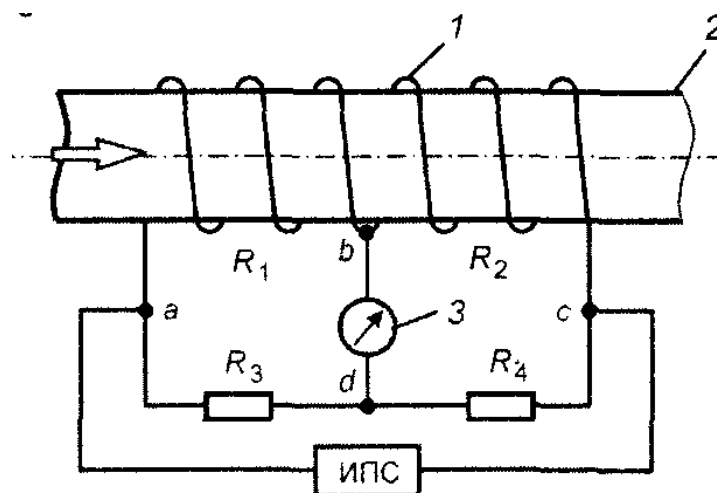


Рисунок 1.13 – Термоконвективный расходомер совмещенными нагревателем и термопреобразователями

1 – двухсекционный нагреватель; 2 – трубопровод; 3 – измерительный прибор; R_1 , R_2 , R_3 и R_4 – терморезисторы.

В схеме (рисунок 1.13) нагреватель состоит из двух секций, являющихся одновременно терморезисторами R_1 и R_2 , включенными в мостовую схему с терморезисторами R_3 и R_4 . Они нагреваются током от стабилизированного источника напряжения ИПС. При отсутствии расхода среды распределение температур в стенке трубопровода представляет симметричная кривая 1 (рисунок 1.14). При этом R_1 и R_2 равны и мост находится в равновесии. С появлением расхода среды температура T_1 и сопротивление R_1 становятся меньше температуры T_2 и сопротивления R_2 , а распределение температур соответствует кривой 2. С ростом расхода среды возрастает разность температур $T_2 - T_1$, увеличивается разность потенциалов в точках b и d , измеряемая прибором 3, шкала которого отградуирована в единицах расхода.

В термоконвективных микрорасходомерах обычно применяют термометры сопротивления (медные, никелевые). В остальных типах термоконвективных расходомеров применяют термобатареи (последовательно соединенные медь-константановые или хромель-копелевые термопары) с числом спаев 8...30. Спаи термобатареи располагают в местах измерения температур T_1 и T_2 , и таким образом получаемая ТЭДС (1...10 мВ) соответствует разности температур $\Delta T = T_2 - T_1$. Спаи должны быть электрически изолированы от стенки трубы и в то же время их температура должна соответствовать температурам стенки. Для изоляции служат синтетические смолы и цемент. Сами же спаи и термоэлектроды должны иметь минимальные размеры.

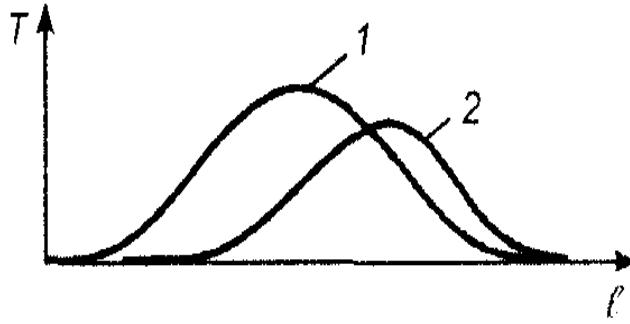


Рисунок 1.14 – Распределение температур в стенке трубопровода в отсутствие (1) и при наличии расхода (2) среды.

5.3 Термоанемометры

Действие термоанемометров (рисунок 1.15) основано на зависимости между потерей теплоты непрерывно нагреваемого тела (элемента), погруженного в поток, и скоростью газа (или жидкости). Поток газа или жидкости, обтекающий электрически обогреваемый чувствительный элемент, охлаждает его. При постоянной мощности нагревания температура чувствительного элемента (а при постоянной температуре — потребляемая им мощность) является мерой скорости потока.

Достоинства: большой диапазон скоростей, высокое быстродействие, позволяющее измерять скорости, изменяющиеся с частотой в несколько тысяч герц.

Недостатки: хрупкость первичных преобразователей вследствие динамических нагрузок и высокой температуры нагревания. [4]

Первичные преобразователи термоанемометров делятся на полупроводниковые (термисторы) и металлические, которые в свою очередь подразделяются на проволочные и пленочные.

Чувствительный элемент проволочного преобразователя — тонкая и обычно короткая проволочка (термонить) из платины, вольфрама, никеля. Наибольшую температуру нагревания проволочки (до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) допускает платина, а вольфрамовая проволочка допускает нагревание до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$.

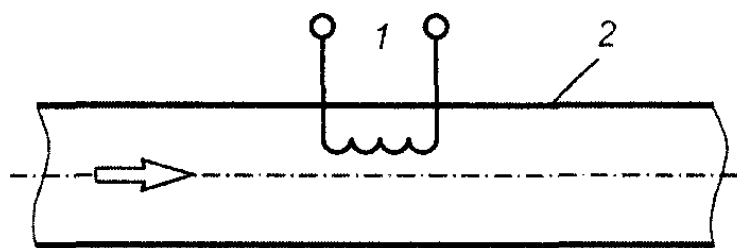


Рисунок 1.15 – Термоанемометр

1 – проволочный нагревательный элемент; 2 – трубопровод.

Достоинством является отсутствие подвижных частей и, соответственно, потенциально высокая надежность работы в условиях пневмоударов, перегрузок и т. д.

Основной недостаток термоанемометрических расходомеров, относящихся к классу тепловых, является следствием их принципа действия. Они фактически измеряют теплосъем с нагревательного элемента, который (при известной теплоемкости среды) однозначно связан с массовым расходом. Таким образом, приборы данного типа являются счетчиками массового расхода газа. Это могло стать достоинством, если бы расчет за газ производился с оплатой за единицу массы. Однако в нашей стране потребитель платит за объем газа, приведенный к нормальным условиям. Соответственно, для перехода от массового расхода к расходу природного газа при нормальных условиях требуется указанный массовый расход разделить на плотность газа при нормальных условиях. Однако плотность зависит от состава газа, а ее изменения в течение короткого времени могут достигать 10 % и более. В то же время состав газа самим прибором не измеряется и может вноситься вручную не чаще нескольких раз в сутки. Поэтому данные приборы вообще трудно отнести к приборам, пригодным для коммерческого учета газа, что обоснованно в [5].

6. Электромагнитные расходомеры

Среди известных и широко применяемых методов измерения расхода жидкостей в химической промышленности большое внимание заслуживает электромагнитный метод измерения.

Электромагнитный расходомер — это измерительный прибор, работа которого основана на принципе электромагнитной индукции. В соответствии с принципом электромагнитной индукции при движении электрического проводника через магнитное поле под прямым углом (90°) к полю, в проводнике индуцируется напряжение. Для индукции напряжения необходимо наличие трех факторов: проводника, магнитного поля и перемещения проводника относительно магнитного поля. Чем больше относительное перемещение, тем выше полученное напряжение [2].

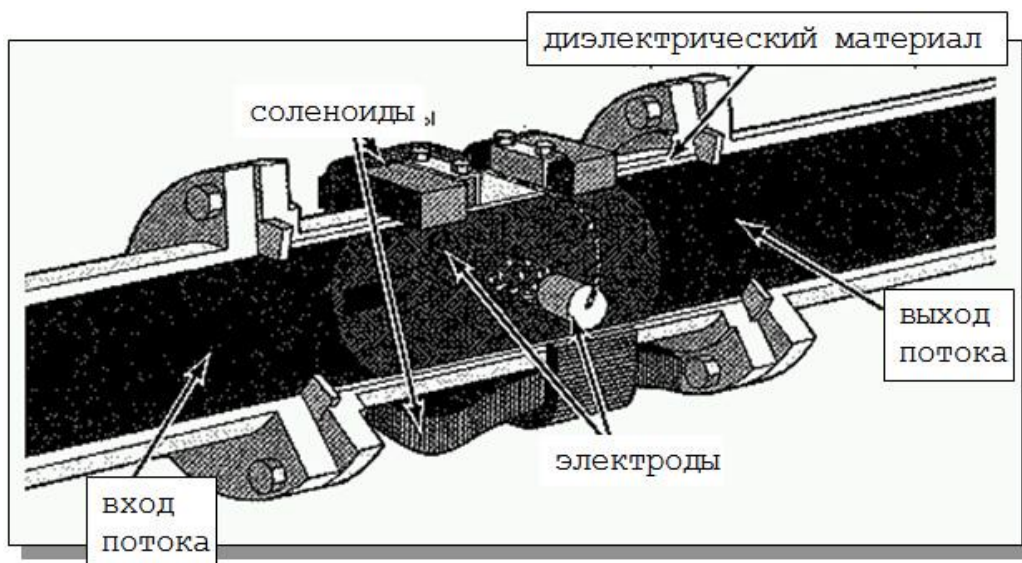


Рисунок 1.16 – Схема электромагнитного расходомера

Электромагнитный расходомер работает только со средой, проводящей электрический ток. Для измерения расхода потока диэлектрических сред необходимо использовать расходомеры других типов.

Принцип работы электромагнитного расходомера. Электромагнитный расходомер состоит из трубы с комплектом соленоидов, закрепленных на внешней поверхности трубы. Соленоиды используются для создания магнитного поля, необходимого для получения напряжения. В трубе также находятся два металлических столбика или электрода. Электродами заканчивается электрическая цепь между проводящей электрический ток средой и устройством, с помощью которого снимаются показания интенсивности возбужденного напряжения. Во избежание потери напряжения, труба электромагнитного расходомера покрыта диэлектрическим (непроводящим электрический ток) материалом.

По мере того, как среда, способная проводить электрический ток, движется через электромагнитный расходомер, она проходит сквозь магнитное поле, и в среде возбуждается напряжение. Проводящая электрический ток среда является тем проводником, который необходим для получения напряжения.

Движение среды-проводника через магнитное поле является тем относительным движением, которое необходимо для возбуждения напряжения. Это напряжение индуцируется в среде-проводнике и подается на электроды. По проводам, подсоединенным к электродам напряжение подается на устройство, которое измеряет интенсивность напряжения. Чем больше скорость или относительное движение среды-проводника, проходящей через электромагнитный расходомер, тем выше напряжение. Поэтому измерение величины этого напряжения является одним из способов измерения скорости движения среды. А затем величина, полученная в результате измерения скорости потока может быть преобразована в параметр расхода потока.

7. Вихревые расходомеры

Вихревой расходомер — это стандартный расходомер, в основе работы которого лежит измерение скорости движения потока. Этим расходомерами можно измерять расход потока таких сред, как пар или газ с твердыми частицами во взвешенном состоянии. В конструкции вихревых расходомеров отсутствуют подшипники илидвигающиеся рабочие детали, которые могут повреждаться из-за попадания твердых частиц [2]. Схема вихревого расходомера представлена на рисунке 1.17.

Принцип работы вихревого расходомера. Вихревое движение или движение с завихрениями возникает тогда, когда на пути движущегося потока помещают какой-либо объект. То, как часто формируются завихрения зависит непосредственно от скорости потока. Другими словами, чем выше скорость потока движущейся среды, тем больше количество завихрений, формирующихся за определенный промежуток времени.

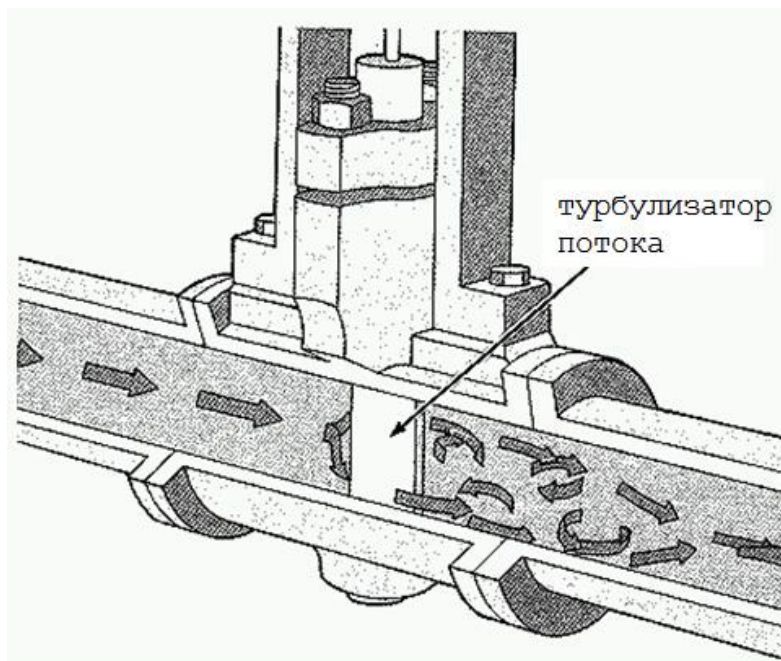


Рисунок 1.17 – Схема вихревого расходомера

Для того чтобы получить завихрения, в центре расходомера помещают плохо-обтекаемый предмет, называемый турбулизатором потока. Форма типовых турбулизаторов потока обычно треугольная.

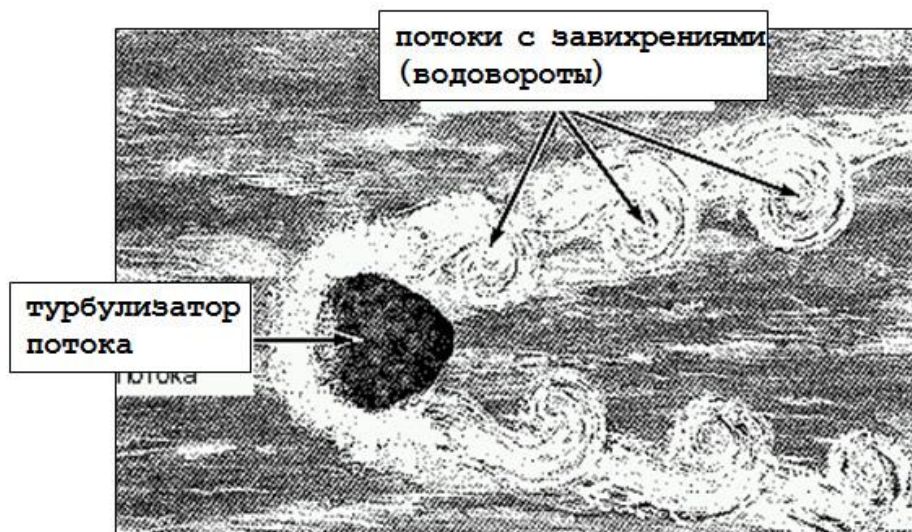


Рисунок 1.18 – Пример потока с завихрениями

Поток обходит острые выступы турбулизатора, формируя завихрения. Область низкого давления, образуемая в центре каждого завихрения, способствует дальнейшему созданию силового напряжения, воспринимаемого турбулизатором. До

формирования первого завихрения давление по обе стороны турбулизатора одинаково, но в результате формирования завихрения с одной стороны турбулизатора образуется область низкого давления, а наличие областей низкого и высокого давления в месте установки турбулизатора приводит к появлению режима перепада давления. В результате режима перепада давления турбулизатор потока оказывается под воздействием силового напряжения то с одной, то с другой стороны, в соответствии с переменной последовательностью формирования завихрений. Другими словами, нагрузка или напряжение воспринимается турбулизатором потока то с одной, то, с другой стороны.

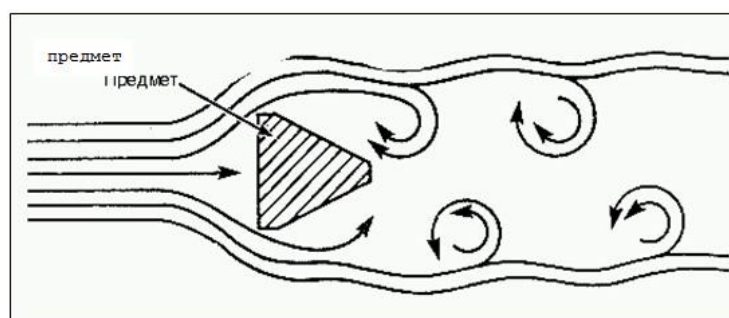


Рисунок 1.18 – Переменное чередование завихрений

В вихревом расходомере имеются датчики, которые реагируют на это напряжение, считывая любое отклонение турбулизатора в результате воздействия завихрений. Выходной сигнал датчиков — это сигнал небольшого напряжения, который представляет собой частоту формирования завихрений, чья величина прямо пропорциональна расходу потока. Сигнал напряжения передается на другое устройство со стрелкой или каким-либо другим визуальным индикатором, который выдает показания расхода потока жидкости, газа или пара, проходящих через расходомер.

8. Ультразвуковые расходомеры

Действие ультразвуковых расходомеров основано на зависимости от расхода вещества разности времен прохождения ультразвуковых сигналов по потоку вещества и против него. Измеряется время прохождения ультразвукового сигнала от одного излучателя до приемника по направлению течения вещества (например, жид-

кости), так и против его течения. Разница во времени прохождения ультразвукового сигнала будет прямо пропорциональна скорости потока вещества, а знак этой разности покажет направление потока.



Рисунок 1.19 – Ультразвуковой расходомер

По мере увеличения скорости движения потока, увеличивается также и сдвиг по частоте. И наоборот, если скорость движения потока среды уменьшается, то уменьшается и сдвиг по частоте. Другими словами, каждому изменению скорости потока присущ соответствующий сдвиг по частоте. Для измерения скорости потока среды в ультразвуковых расходомерах используется эта взаимосвязь. Затем расходомер преобразует величину скорости потока в соответствующую величину расхода потока.

Сдвиг по частоте между переданными и принятыми звуковыми волнами — это один пример естественного феномена, известного под названием эффект Доплера. Он имеет место при условии наличия относительного движения между источником волны и приемником этой волны. В ультразвуковом расходомере движущиеся вместе с потоком среды пузырьки воздуха или твердые частицы становятся передатчиками волн, т.к. от них отражаются волны.

9. Расходомер Кориолиса

Кориолисовыми называются расходомеры, в преобразователях которых под влиянием силового воздействия возникает кориолисовое ускорение, зависящее от

расхода. Для образования этого ускорения непрерывно вращающемуся преобразователю расхода придают конфигурацию, заставляющую поток перемещаться в радиальном направлении по отношению к оси вращения, совпадающей с осью трубопровода.

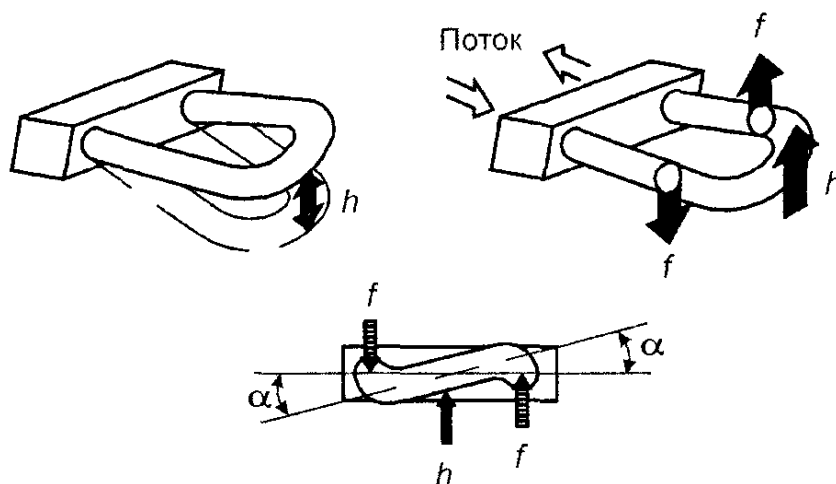


Рисунок 1.20 – Силы, действующие на первичный преобразователь кориолисового расходомера: f — силы воздействия; h — перемещение; α — угол закручивания

Кориолисовые массовые расходомеры непосредственно измеряют массовый расход жидкостей, газов и взвесей без предварительного определения плотности и объема. Схема первичного преобразователя изображена на рисунке 1.20. Труба, имеющая U-образную форму, после приведения ее с помощью электромагнитной катушки в колебательное движение, колеблется с собственной частотой (амплитуда менее 1 мм, частота — десятки герц). При движении трубы вверх газ, втекающий в трубу, давит на трубу вниз. На выходе из нее тот же газ дополнительно способствует движению трубы вверх, что, собственно, приводит к закручиванию U-образной трубы. Во время второго периода колебаний, когда U-образная труба движется вниз, она закручивается в противоположную сторону. Это закручивание называют эффектом Кориолиса. Угол закручивания трубы прямо пропорционален расходу газа. Электромагнитные датчики, расположенные с каждой стороны трубы, изме-

ряют скорость колебания трубы. Массовый расход газа определяют, измеряя разницу во времени поступления двух сигналов по скорости, эта разница прямо пропорциональна массовому расходу газа.

Кориолисовые расходомеры относят к «интеллектуальным» изделиям, так как они могут иметь встроенные микроконтроллеры для вычисления комплекса показателей.

Постановка задачи исследования

На сегодняшний день наибольшее применение получили кориолисовые, электромагнитные, вихревые расходомеры и расходомеры, основанные на методе переменного перепада давления. Потребитель, эксплуатирующий компрессорную технику, часто не имеет возможности приобрести, освоить и правильно эксплуатировать эти точные приборы. Как правило, потребитель имеет примерные представления о том, что производительность связана с временем наполнения воздухоборника (ресивера). При этом он может проводить измерения с помощью ресивера совершенно разными способами, не задумываясь о том, как влияет режим наполнения на результат. Поэтому важной задачей является определение оптимального режима наполнения ресивера, при котором полученные значения производительности будут достаточно близки к показаниям расходомера.

Для решения задачи необходимо провести измерение производительности при разных режимах наполнения ресивера и путем сравнения производительности, полученной на ресивере и расходомере, определить оптимальный режим наполнения.

2 ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Схема установки для измерения производительности ресивером

Одним из важнейших энергетических параметров компрессорной установки является объемная производительность – объем воздуха, подаваемый в единицу времени.

Для изучения режимов наполнения ресивера необходимо организовать пневматическую сеть согласно схеме, представленной на рисунке 2.1.

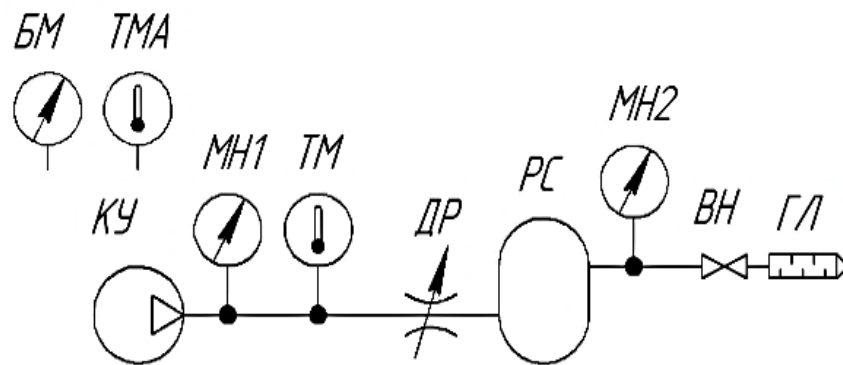


Рисунок 2.1 - Схема измерения производительности ресивером

Измерительная линия (рисунок 2.1) имеет манометр МН1, по которому дросселем ДР настраивается рабочее давление p_p на компрессорной установке КУ. Измерение производительности осуществляется только при рабочем давлении и на установившемся тепловом режиме. Режим считается установившимся, как только изменение показаний термометра ТМ прекратится.

Для измерения производительности по манометру МН2 фиксируют начальное давление в ресивере p_1 , а по термометру ТМ – конечную температуру сжатого воздуха T_2 . После этого закрывают кран ВН и в этот же момент включают секундомер, начинают измерять время наполнения τ . По манометру МН2 следят за ростом давления. При этом дроссель ДР плавно приоткрывают на протяжении всего времени

испытания для поддержания на КУ рабочего давления p_p постоянным. При достижении конечного давления p_2 по манометру МН2 секундомер выключают. ВН может быть открыт, КУ остановлена.

Для контроля сложившихся на момент испытаний окружающих условий применяются барометр БМ, измеряющий атмосферное давление $p_{атм}$, и термометр ТМА, измеряющий температуру $T_{атм}$ окружающего воздуха вблизи всасывающего окна компрессора.

2.2 Вывод формулы для расчета производительности

Производительность компрессорной установки (станции) всегда дается при стандартных условиях (таблица 2.1)

Стандартные условия для определения объема газов приведены в таблице 2.1 [14]. По ним осуществляется пересчет фактической объемной производительности Q_f к приведенной к стандартным условиям Q_n .

Таблица 2.1 - Стандартные условия для определения объема газов

Параметр газа	Ед. изм.	Значение
Температура	°С	20,0
	°К	293,15
Давление	Па	101325
	мм. рт. ст.	760
Влажность	г/м ³	0

- 1) Для пересчета фактической производительности Q_f к производительности, приведенной к стандартным условиям, Q_n используется формула:

$$Q_n = Q_f \cdot k_1 \cdot k_2 \quad (2.1)$$

где Q_f – фактическая производительность, м³/мин;

k_1 – поправочный коэффициент в точке измерения производительности;

k_2 – поправочный коэффициент на условия всасывания

Чтобы правильно произвести вычисления фактической производительности $Q_{\text{ф}}$, сначала требуется перевести её к стандартным условиям в точке измерения (коэффициент k_1), т.е. вычислить Q_{PM} , а затем – к стандартным условиям окружающей среды на всасывании (коэффициент k_2).

$$k_1 = \frac{T_{\text{ст}}}{T_2} \quad (2.2)$$

где $T_{\text{ст}}$ – температура стандартная, $T_{\text{ст}} = 20 \text{ °C} = 293 \text{ °K}$;

T_2 – температура внутри ресивера в конце процесса, °K;

Показания расходомера, совпадают с тем, что получится при пересчете с поправкой k_1 . В нашем случае этот коэффициент уменьшающий исходя из того, что чем сильнее нагрет воздух, тем больше объем и скорость газа, проходящего через расходомер, а значит и больше импульсов, полученных расходомером. В противном случае, при низкой температуре, расходомер показывал бы значения ниже. Т.е. в точке измерения нагрев воздуха вызывает завышение показаний прибора, поэтому для точности измерений необходимо провести пересчет с данным коэффициентом.

$$k_2 = \frac{T_{\text{атм}}}{T_{\text{ст}}} \cdot \frac{p_1}{p_{\text{атм}}} \quad (2.3)$$

где $p_{\text{ст}}$ – давление атмосферное стандартное, $p_{\text{ст}} = 101325 \text{ Па} = 0,101 \text{ МПа}$;

$T_{\text{ст}}$ – температура стандартная, $T_{\text{ст}} = 20 \text{ °C} = 293 \text{ °K}$;

$p_{\text{атм}}$ – давление атмосферное вблизи всасывающего окна компрессора, сложившееся на момент измерения производительности кПа;

$T_{\text{атм}}$ – температура окружающего воздуха, сложившаяся на момент измерения производительности, °К.

Опишем формулу (2.3): компрессор винтовой - это объемная машина, а объемная машина не может забрать из атмосферы объем выше рабочего. Следует помнить, что чем холоднее и выше давление в месте испытаний, тем больше производительность компрессоров, поэтому приведение производительности к стандартным условиям на всасывании делает конкурентную борьбу изготовителей, расположенных в разных климатических районах и на разных геодезических высотах, честной, а испытания – независимыми от времени года. Поэтому поправочный коэффициент k_2 – увеличивающий. Если атмосферное давление ниже, чем стандартное, то компрессор снова забирает из атмосферы разреженный воздух, т.е. производительность, замеренная прибором в данной ситуации, меньше чем истинная величина производительности винтового компрессора.

Данные поправки позволяют однозначно определять производительность компрессора вне зависимости от того, где находится компрессор, т.е. при различных условиях окружающей среды.

2) Найдем фактическую производительность $Q_{\text{ф}}$, по следующей формуле:

$$Q_{\text{ф}} = \frac{\Delta V}{\tau} \quad (2.4)$$

где ΔV – объем газа, поступивший в ресивер, м³;

τ – время наполнения ресивера, мин.

$$\Delta V = V_1 \cdot x_{\text{об}} \quad (2.5)$$

где V_1 – объем ресивера (или первоначальный объем воздуха), м³;
 $x_{об}$ – количество объемов, поступивших в ресивер.

$$x_{об} = \frac{V_{св}}{V_2} \quad (2.6)$$

$V_{св}$ – свободный объем ресивера, м³ ;

V_2 – объем газа после сжатия до давления p_2 , м³;

- 3) С учетом того, что в ресивере изначально был объем воздуха V_1 , который сжался, то свободный объем не равен объему ресивера, поэтому свободный объем надо вычислить:

$$V_{св} = V_1 - V_2 \quad (2.7)$$

- 4) Для того чтобы найти объем газа V_2 после сжатия до давления p_2 , используются классические формулы политропного процесса [15]:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n \quad (2.8)$$

где p_1 – давление в ресивере в начале процесса сжатия, МПа;

p_2 – давление в ресивере в конце процесса сжатия, МПа

V_1 – объем ресивера (или первоначальный объем воздуха), м³;

n – показатель политропы.

Из формулы (2.8) неизвестен объем газа после сжатия V_2 и показатель политропы n , который можно найти при известных температурах, по формуле [15]:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (2.9)$$

где T_1 – температура газа в начале процесса сжатия, °К;

T_2 – температура газа в конце процесса сжатия, °К.

T_1 известно если:

1. Ресивер находился длительное время в окружающих условиях, для которых известна окружающая температура $T_{\text{окр ср}}$, тогда $T_1 \approx T_{\text{окр ср}}$;
2. Установлен термометр в ресивере или на входе в ресивер.

T_2 известно если:

1. Установлен термометр на выходе из компрессорной установки;
2. Установлен термометр в ресивере или на входе в ресивер.

Следовательно, показатель политропы n можно определить при наличии манометра и термометра.

5) Выразим показатель политропы n через температуру

$$\frac{n-1}{n} = \log_{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)} \frac{T_2}{T_1} \quad (2.10)$$

$$n-1 = n \log_{\left(\frac{p}{p_1}\right)} \frac{T_2}{T_1} \quad (2.11)$$

$$n \left(1 - \log_{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)} \frac{T_2}{T_1} \right) = 1 \quad (2.12)$$

$$n = \frac{1}{1 - \log_{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)} \frac{T_2}{T_1}} \quad (2.13)$$

б) Объем V_2 образуется при сжатии объема газа равного объему ресивера V_1 до конечного давления p_2 , потому как в ресивере первоначально всегда присутствует объем газа, то в ходе испытания он сожмется. Выразим объем газа после сжатия V_2 из уравнения (2.8), которое представим в следующем виде:

$$p_1 V_1^n = p_2 V_2^n \quad (2.14)$$

$$V_2^n = \frac{p_1 V_1^n}{p_2} \quad (2.15)$$

$$V_2 = V_1^n \sqrt[n]{\frac{p_1}{p_2}} \quad (2.16)$$

Полученные зависимости (уравнения (2.5) - (2.7), (2.13), (2.16) подставим в первоначальную формулу (2.1) и проведем ряд математических преобразований:

$$Q_{\Pi} = Q_{\Phi} \cdot k_1 \cdot k_2 \quad (2.1)$$

$$Q_{\Pi} = \frac{\Delta V}{\tau} \cdot \frac{T_{\text{эф}}}{T_2} \cdot \frac{T_{\text{атм}}}{T_{\text{эф}}} \cdot \frac{p_{\text{ст}}}{p_{\text{атм}}}$$

$$Q_{\Pi} = \frac{V_1 \cdot x_{\text{об}}}{\tau} \cdot \frac{T_{\text{эф}}}{T_2} \cdot \frac{T_{\text{атм}}}{T_{\text{эф}}} \cdot \frac{p_{\text{ст}}}{p_{\text{атм}}}$$

$$Q_{\Pi} = \frac{V_1 \cdot \frac{V_1 - V_2}{V_2}}{\tau} \cdot \frac{T_{\text{эф}}}{T_2} \cdot \frac{T_{\text{атм}}}{T_{\text{эф}}} \cdot \frac{p_{\text{ст}}}{p_{\text{атм}}}$$

$$Q_{\Pi} = \frac{V_1 \cdot \left(V_1 - V_1^n \sqrt[n]{\frac{p_1}{p_2}} \right)}{\tau \cdot V_1^n \sqrt[n]{\frac{p_1}{p_2}}} \cdot \frac{\tau_{\text{атм}}}{\tau_{\text{рес}}} \cdot \frac{p_{\text{ст}}}{p_{\text{атм}}}$$

$$Q_{\Pi} = \frac{V_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1 - \log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \frac{T_2}{T_1}} \right)}{\tau \cdot \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1 - \log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \frac{T_2}{T_1}}} \cdot \frac{T_{\text{атм}}}{T_2} \cdot \frac{p_{\text{ст}}}{p_{\text{атм}}} \quad (2.17)$$

Таким образом, получена формула для вычисления объемной производительности компрессорной установки при стандартных условиях на всасывании. Чтобы воспользоваться формулой 2.17, следует измерить (или знать) следующие параметры:

V_1 – объем ресивера (или первоначальный объем воздуха), м³;

p_1 – давление в начале испытаний, МПа;

p_2 – давление в конце испытаний, МПа;

T_1 – температура в начале испытаний, °К;

T_2 – температура в конце испытаний, °К;

$T_{\text{атм}}$ – температура окружающего воздуха, сложившаяся на момент измерения производительности, °К;

$p_{\text{атм}}$ – давление атмосферное вблизи всасывающего окна компрессора, сложившееся на момент измерения производительности, МПа;

$p_{\text{ст}}$ – давление атмосферное стандартное, $p_{\text{ст}} = 101325 \text{ Па} = 0,101 \text{ МПа}$;

2.3 Описание режимов и контролируемых параметров

2.3.1 Режим 1

Для измерения производительности необходимо организовать пневматическую сеть согласно схеме, показанной на рисунке 2.2. Включить КУ нажатием кнопки «Пуск». Необходимо дождаться достижения установившегося режима работы, о чем можно судить по термометру, т.к. в данной схеме он отсутствует сделаем грубую поправку о том, что компрессорная установка КУ выйдет на установившийся режим через 15 мин.

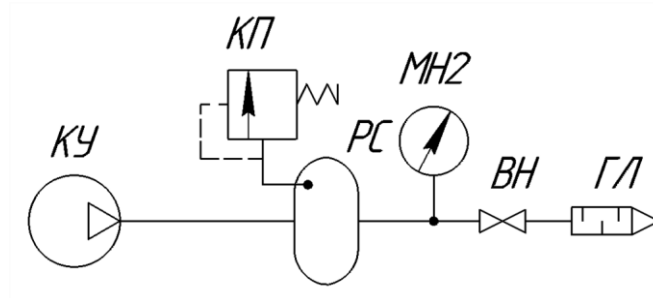


Рисунок 2.2 – Схема пневматической линии №1

По манометру МН2 фиксируют начальное давление в ресивере p_1 . После этого закрывают кран шаровой ВН и в этот же момент включают секундомер, начинают измерять время наполнения τ . При достижении конечного давления p_2 по манометру МН2 секундомер выключают. Кран шаровой ВН может быть открыт, компрессорная установка КУ остановлена.

Далее проводят расчёт фактической производительности Q_ϕ по формуле 2.4 (п.2.2):

$$Q_\phi = \frac{\Delta V}{\tau} = \frac{V_1 \cdot x_{об}}{\tau} = \frac{V_1 \cdot V_{св}}{\tau \cdot V_2} = \frac{V_1 \cdot (V_1 - V_2)}{\tau \cdot V_2} \quad (2.4)$$

$$V_2 = V_1 \sqrt[n]{\frac{p_1}{p_2}} \quad (2.16)$$

Как можно увидеть, в данной формуле отсутствуют коэффициенты k_1 и k_2 . Это связано с тем, что в схеме данного исполнения невозможно сделать поправку на прибор и на условия всасывания. Коэффициент политропы n считают по формуле (п. 2.2):

$$n = \frac{1}{1 - \log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \frac{T_2}{T_1}} \quad (2.13)$$

Так как, условия не позволяют измерить температуру (нет термометра), на основе опытных данных принимается допущение, что температура в процессе сжатия меняется несущественно. Если накачивать ресивер сжатым воздухом медленно, тогда температура в конце и в начале процесса сжатия будет примерно равна $T_1 \approx T_2$, а коэффициент политропы $n = 1$. Конечная формула для расчета фактической производительности в схеме №1 будет примет вид:

$$Q_\phi = \frac{V_1 \cdot \left(1 - \frac{p_1}{p_2}\right)}{\tau \cdot \frac{p_1}{p_2}} \quad (2.18)$$

2.3.2 Режим 2

Для измерения производительности необходимо организовать пневматическую сеть согласно схеме, представленной на рисунке 2.3. Включить компрессорную установку КУ нажатием кнопки «Пуск». Необходимо дождаться достижения установившегося режима работы, о чем можно судить по термометру, т.к. в данной схеме он отсутствует сделаем грубую поправку о том, что компрессорная установка КУ выйдет на установившийся режим через 15 мин.

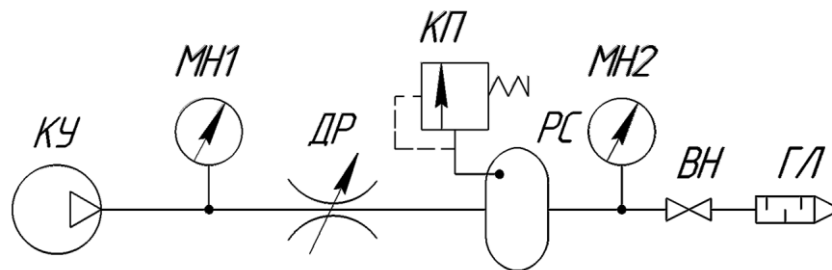


Рисунок 2.3 – Схема пневматической линии №2

В схеме №2 измерительная линия (рисунок 2.3) имеет манометр МН1, по которому дросселем ДР настраивается рабочее давление p_p на компрессорной установке КУ. Измерение производительности осуществляется только при рабочем давлении p_p .

Для измерения производительности по манометру МН2 фиксируют начальное давление в ресивере p_1 . После этого закрывают кран шаровой ВН и в этот же момент включают секундомер, начинают измерять время наполнения τ . По манометру МН2 следят за ростом давления. При этом дроссель ДР плавно приоткрывают на протяжении всего времени испытания для поддержания на КУ рабочего давления p_p постоянным по МН1. При достижении конечного давления p_2 по манометру МН2 секундомер выключают. Кран шаровой ВН может быть открыт, КУ остановлена.

Далее проводят расчёт фактической производительности Q_ϕ по формуле 2.18 (п 2.3.1):

$$Q_\phi = \frac{V_1 \cdot \left(1 - \frac{p_1}{p_2}\right)}{\tau \cdot \frac{p_1}{p_2}} \quad (2.18)$$

2.3.3 Режим 3

Для измерения производительности необходимо организовать пневматическую сеть согласно схеме, показанной на рисунок 2.4.

Измерительная линия (рисунок 2.4) имеет манометр МН1, по которому дросселем ДР настраивается рабочее давление p_p на компрессорной установке КУ. Измерение производительности осуществляется только при рабочем давлении и на установившемся тепловом режиме.

Включить КУ нажатием кнопки «Пуск». Плавно закрывать дроссель ДР, пока давление на манометре МН1 не достигнет номинального значения. Ожидать достижения установившегося режима работы, о чем можно судить по бесконтактному термометру ТМ1: достигнув номинального значения, температура сжатого воздуха не должна меняться более чем на ± 1 °С. Время выхода на установившийся режим - не менее 15 мин.

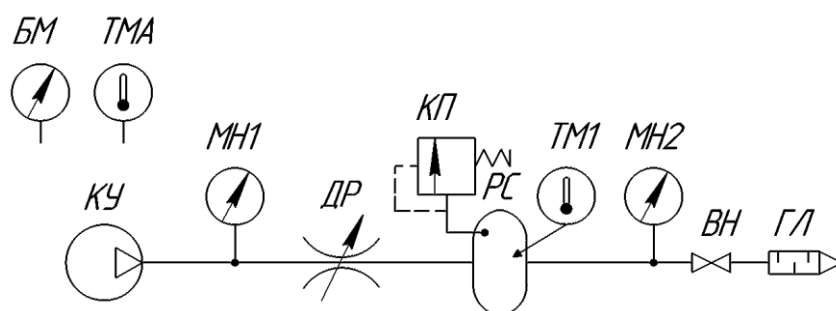


Рисунок 2.4 – Схема пневматической линии №3

Для измерения производительности по манометру МН2 фиксируют начальное давление в ресивере p_1 , а по бесконтактному термометру ТМ1 – начальную температуру стенки ресивера T_1 . После этого закрывают кран шаровой ВН и в этот же момент включают секундомер, начинают измерять время наполнения τ . По манометру МН2 следят за ростом давления. При этом дроссель ДР плавно приоткрывают на протяжении всего времени испытания для поддержания на компрессорная установка КУ рабочего давления p_p по манометру МН1 постоянным. При достижении конечного давления p_2 по манометру МН2, секундомер выключают, и проводят измерения температуры стенки ресивера в конце процесса сжатия T_2 – бесконтактным термометром ТМ1. Кран шаровой ВН может быть открыт, компрессорная установка КУ остановлена.

Для контроля сложившихся на момент испытаний окружающих условий применяются барометр БМ, измеряющий атмосферное давление $p_{\text{атм}}$, и термометр ТМА, измеряющий температуру $T_{\text{атм}}$ окружающего воздуха вблизи всасывающего окна компрессора.

Далее проводят расчёт искомой производительности $Q_{\text{п}}$ по формуле 2.17 (п.2.2):

$$Q_{\text{п}} = \frac{V_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1 - \log \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \frac{T_2}{T_1}} \right)}{\tau \cdot \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1 - \log \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \frac{T_2}{T_1}}} \cdot \frac{T_{\text{атм}}}{T_2} \cdot \frac{p_{\text{ст}}}{p_{\text{атм}}} \quad (2.17)$$

2.3.4 Режим 4

Для измерения производительности необходимо организовать пневматическую сеть согласно схеме, показанной на рисунке 2.5.

Включить компрессорную установку КУ нажатием кнопки «Пуск». Плавно закрывать дроссель ДР, пока давление на манометре МН1 не достигнет номинального значения. Ожидать достижения установившегося режима работы, о чем можно судить по термометру ТМ2: достигнув номинального значения, температура сжатого воздуха не должна меняться более чем на ± 1 °С. Время выхода на установившийся режим - не менее 15 мин.

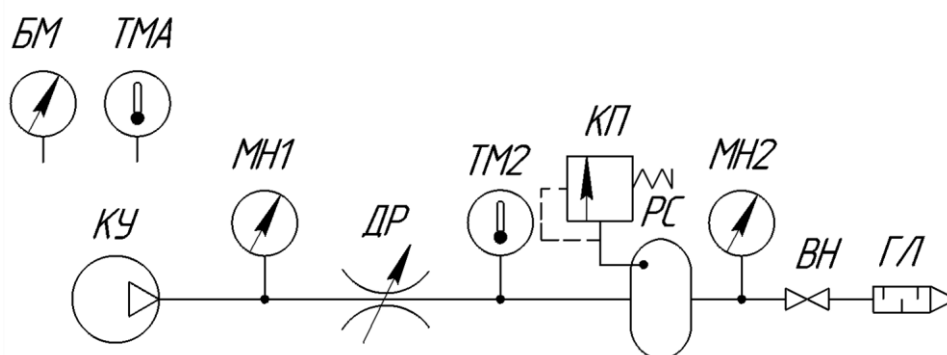


Рисунок 2.5 – Схема пневматической линии №4

Для измерения производительности по манометру МН2 фиксируют начальное давление в ресивере p_1 , а по термометру ТМ1, установленному в непосредственной близости от ресивера, начальную температуру сжатого воздуха T_1 . После этого закрывают кран шаровой ВН и в этот же момент включают секундомер, начинают измерять время наполнения τ . По манометру МН2 следят за ростом давления. При этом дроссель ДР плавно приоткрывают на протяжении всего времени испытания для поддержания на компрессорной установке КУ рабочего давления p_p постоянным. При достижении конечного давления p_2 по манометру МН2, секундомер выключают, далее измеряют температуру сжатого воздуха в конце процесса сжатия T_2 –термометром ТМ2. Кран шаровой ВН может быть открыт, компрессорная установка КУ остановлена.

Для контроля сложившихся на момент испытаний окружающих условий применяются барометр БМ, измеряющий атмосферное давление $p_{атм}$, и термометр ТМА, измеряющий температуру $T_{атм}$ окружающего воздуха вблизи всасывающего окна компрессора.

Далее проводят расчёт искомой производительности $Q_{п}$ по формуле 2.17 (п.2.2):

$$Q_{п} = \frac{V_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1 - \log \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \frac{T_2}{T_1}} \right)}{\tau \cdot \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1 - \log \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \frac{T_2}{T_1}}} \cdot \frac{T_{атм}}{T_2} \cdot \frac{p_{ст}}{p_{атм}} \quad (2.17)$$

2.3.5 Режим 5

Для измерения производительности необходимо организовать пневматическую сеть согласно схеме, показанной на рисунке 2.6.

Измерительная линия (рисунок 2.6) имеет манометр МН1, по которому дросселем ДР настраивается рабочее давление p_p на компрессорной установке КУ. Измерение производительности осуществляется только при рабочем давлении и на установившемся тепловом режиме.

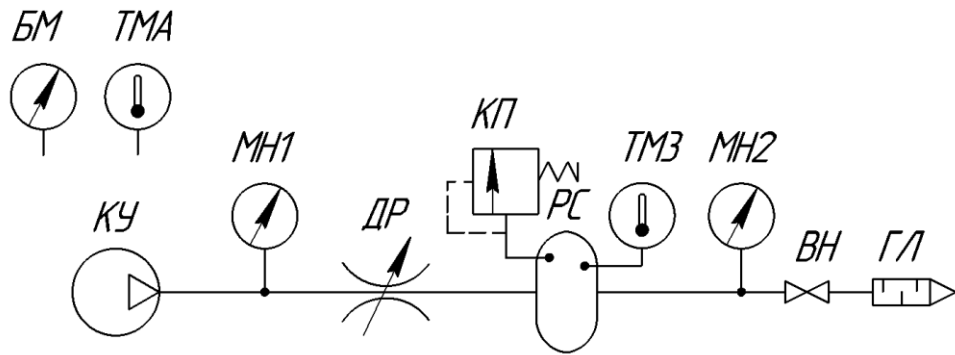


Рисунок 2.6 – Схема пневматической линии №5

Для измерения производительности по манометру МН2 фиксируют начальное давление в ресивере p_1 , а по термометру ТМ3 – начальную температуру сжатого воздуха T_1 внутри ресивера. После этого закрывают кран шаровой ВН и в этот же момент включают секундомер, начинают измерять время наполнения τ . По манометру МН2 следят за ростом давления. При этом дроссель ДР плавно приоткрывают на протяжении всего времени испытания для поддержания на компрессорной установке КУ рабочего давления p_p постоянным. При достижении конечного давления p_2 по манометру МН2, измеряют конечную температуру внутри ресивера в T_2 –термометром ТМ3 и выключают секундомер. Кран шаровой ВН может быть открыт, компрессорная установка КУ остановлена.

Для контроля сложившихся на момент испытаний окружающих условий применяются барометр БМ, измеряющий атмосферное давление $p_{атм}$, и термометр ТМА, измеряющий температуру $T_{атм}$ окружающего воздуха вблизи всасывающего окна компрессора.

Далее проводят расчёт искомой производительности $Q_{п}$ по формуле 2.17 (п 2.2):

$$Q_{п} = \frac{V_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1 - \log \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \frac{T_2}{T_1}} \right)}{\tau \cdot \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1 - \log \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \frac{T_2}{T_1}}} \cdot \frac{T_{атм}}{T_2} \cdot \frac{p_{ст}}{p_{атм}} \quad (2.17)$$

2.4 Контрольные измерения с помощью расходомера

Измерительная линия (рисунок 2.7) имеет манометр показывающий МН, по которому дросселем ДР настраивается рабочее давление на компрессорной установке КУ. Измерение производительности осуществляется только при рабочем давлении и на установившемся тепловом режиме. Режим считается установившимся, как только изменение показаний термометра ТМ прекратится.

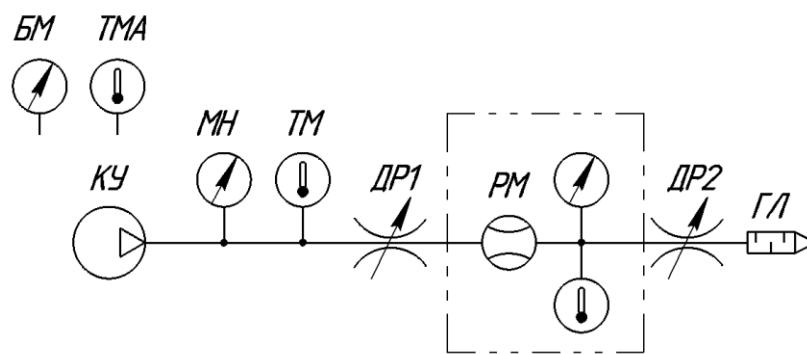


Рисунок 2.7 – Схема №6 для измерения производительности расходомером

Для контроля сложившихся на момент испытаний окружающих условий применяются барометр БМ и термометр ТМА.

Дроссель ДР2 служит для поддержания давления на расходомере РМ, если это необходимо. Глушитель ГЛ обеспечивает низкий уровень шума сбрасываемого воздуха.

Расходомер имеет встроенные датчики давления и температуры, что позволяет ему автоматически вычислять производительность при стандартных условиях в точке измерения производительности Q_{PM} . Важно, что эта производительность не является искомой, т.к. не приведена к стандартным окружающим условиям (условиям всасывания).

Найдем производительность при стандартных условиях на всасывании по формуле для расходомера с функцией пересчета. Для начала произведем такие же вычисления, что делает расходомер, т.е. найдем производительность Q_{PM} :

$$Q_{PM} = Q_{\phi} \cdot \frac{p_1}{p_{CT}} \cdot \frac{T_{CT}}{T_2} \quad (2.18)$$

где Q_{ϕ} – фактическая производительность, м³/мин;

p_1 – давление абсолютное в точке измерения производительности, Па;

p_{CT} – давление атмосферное стандартное, Па;

T_{CT} – температура стандартная, °К;

T_2 – температура в точке измерения производительности, °К;

Теперь вычислим искомую производительность Q_{II} :

$$Q_{II} = Q_{PM} \cdot \frac{T_{ATM}}{p_{ATM}} \cdot \frac{p_{CT}}{T_{CT}} \quad (2.19)$$

Если на месте испытания компрессора и в точке измерения производительности обеспечить условия, равные стандартным, то расходомер сразу покажет искомую производительность. Однако намного проще пересчитать фактическую производительность при известных окружающих условиях и условиях в точке измерения, чем пытаться обеспечить стандартные условия.

Следует помнить, что чем холоднее и выше давление в месте испытаний, тем больше производительность компрессоров, поэтому приведение производительности к стандартным условиям на всасывании делает конкурентную борьбу изготовителей, расположенных в разных климатических районах и на разных геодезических высотах, честной, а испытания – независимыми от времени года.

Выводы по разделу

Таблица 2.2 – Выводы 2 главы

1		<p>Давление на КУ не поддерживается. Наличие секундомера и манометра.</p>	$Q_{\phi} = \frac{V_1 \cdot (1 - \frac{p_1}{p_2})}{\tau \cdot \frac{p_1}{p_2}}$
2		<p>Давление на КУ поддерживается постоянным. Наличие секундомера и манометра.</p>	$Q_{\phi} = \frac{V_1 \cdot (1 - \frac{p_1}{p_2})}{\tau \cdot \frac{p_1}{p_2}}$
3		<p>Давление на КУ поддерживается постоянным. Наличие секундомера, манометра и бесконтактного термометра.</p>	$Q_{\Pi} = \frac{T_{\text{атм}}}{T_2} \cdot \frac{p_{\text{ст}}}{p_{\text{атм}}}$
4		<p>Давление на КУ поддерживается постоянным. Наличие секундомера, 2-х манометров и термометра.</p>	$Q_{\Pi} = \frac{V_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1 - \log\left(\frac{T_2}{T_1}\right)\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}\right)}{\tau \cdot \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1 - \log\left(\frac{T_2}{T_1}\right)\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}}$
5		<p>Давление на КУ поддерживается постоянным. Наличие секундомера, 2-х манометров и термометра.</p>	$Q_{\Pi} = \frac{V_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1 - \log\left(\frac{T_2}{T_1}\right)\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}\right)}{\tau \cdot \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1 - \log\left(\frac{T_2}{T_1}\right)\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}}$
6		<p>Давление на КУ поддерживается постоянным. Для измерения производительности используется расходомер РМ.</p>	$Q_{\Pi} = Q_{\text{РМ}} \cdot \frac{T_{\text{атм}}}{p_{\text{атм}}} \cdot \frac{p_{\text{ст}}}{T_{\text{ст}}}$

3 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Технические характеристики компрессорных установок

Испытания, для выявления оптимального режима наполнения ресивера, проводили на компрессорных установках АКВ-0,81/1 и КВ-10/8, которые производят на ООО «Челябинский компрессорный завод».

3.1.1 Агрегат компрессорный винтовой АКВ-0,81/1

Агрегаты компрессорные винтовые предназначены для выработки сжатого воздуха и снабжения им пневматических систем подвижного состава железных дорог, а также других потребителей. АКВ соответствуют требованиям ГОСТ 10393. При проектировании АКВ были учтены требования современного локомотивостроения.

В сравнении с поршневыми компрессорами АКВ более эффективны, экономичны, менее требовательны к условиям эксплуатации. Конструкция АКВ позволяет сократить время на проведение технического обслуживания и текущих ремонтов, также за счет совершенствования конструкции увеличилась и ремонтпригодность.

Агрегат компрессорный винтовой АКВ 0,81/1 Л У2 предназначен для снабжения сжатым воздухом автоматических тормозов, пневматических цепей управления и вспомогательных пневматических цепей электропоезда типа ЭС2Г «Премиум» (скоростного электропоезда «Ласточка»).

Внешний вид агрегата компрессорного винтового АКВ 0,81/1 Л У2 представлен на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Агрегат компрессорный винтовой АКВ 0,81/1

АКВ 0,81/1 Л У2 изготовлен в соответствии с Техническими требованиями на агрегат компрессорный для электропоезда типа ЭГЭ, разработанными ООО «Уральские локомотивы». Сконструирован модульно и представляет собой полностью законченный узел для монтажа в электропоезде. Включает в себя систему управления и диагностики, совместимые с системой управления электропоезда. Привод компрессора реализован от асинхронного электродвигателя переменного тока через упругую муфту.

По своим габаритно-присоединительным размерам новое изделие полностью унифицировано с применяющимся в настоящее время немецким аналогом.

АКВ 0,81/1 Л У2 снабжен системой подогрева, что обеспечивает его запуск в зимние время при низких температурах окружающего воздуха. Кроме того, он снабжен блоком очистки и осушки сжатого воздуха, что позволяет на выходе получить качественный сжатый воздух.

Внешний дизайн АКВ 0,81/1 Л У2 прост и функционален для максимизации удобства его обслуживания. Кожух капотного типа исключает воздействие потоков воздуха, создаваемых при движении электропоезда, на элементы агрегата компрессорного винтового.

Таблица 3.1 – Технические характеристики АКВ-0,81/1

Параметр	Ед. изм.	Значение
Производительность, н.у.	м ³ /мин	не менее 0,81
Давление конечное избыточное ном.	МПа	не менее 1,0
Количество масла, заливаемого в масляную систему	л	3
Температура эксплуатации	°С	-50...+65
Сжимаемый газ	-	Воздух
Охлаждение	-	Воздушное
Габаритные размеры, ДхШхВ	мм	1540х992х658
Масса агрегата	кг	не более 450

3.1.2 Компрессор винтовой КВ-10/8

Дизельный компрессор КВ-10/8 предназначен для снабжения сжатым воздухом пневмоинструмента, пневмоприводов, оборудования по дробеструйной обработке различных поверхностей, бурового оборудования, при температуре окружающей среды в обычном исполнении от -15°C до $+40^{\circ}\text{C}$, при специальном исполнении – 35°C до $+40^{\circ}\text{C}$.

Обозначение: КВ-10/8 (10,0/0,8), где КВ - марка; 10 - производительность, м³/мин; 0,8 - типоразмерная группа по давлению; 10,0 - производительность, н.у., м³/мин; 0,8 - конечное давление, МПа.

КВ-10/8 – установка, предназначенная для проведения работ с подключением до 10-ти отбойных молотков, продолжительной работы с пескоструйными аппаратами высокой производительности и бетононасосами. Специальное исполнение позволяет размещать их на буровых мобильных установках.



Рисунок 3.2 - Установка дизель-компрессорная винтовая КВ-10/8

Установка выполнена на основе объемного двухвинтового горизонтального маслозаполненного компрессора, включает систему охлаждения и фильтрации воздуха и масла, и систему предохранения от превышения давления, и температуры, снабжена электропневматической системой управления с автоматическим регулированием производительности. По требованиям заказчика установки могут быть снабжены дополнительным оборудованием и опциями.

Установки предназначены для снабжения сжатым воздухом участков с ограниченным или отсутствующим электроснабжением, для работы в сложных климатических условиях. Мобильное исполнение широко применяется в дорожно-строительной отрасли, опрессовки трубопроводных магистралей. Установки большой мощности используются для проведения буровзрывных работ, пескоструйной обработки, прокладки линий связи, испытаний трубопроводов.

Компрессорные установки производятся на основе винтового компрессора производства немецкой фирмы GHH-Rand или Rotorcomp. Средний срок наработки по винтовому компрессору составляет 40000 часов, при условии правильной эксплуатации компрессорной установки. Передача мощности двигателя на винтовой компрессор осуществляется через муфту сцепления дизеля, что позволяет производить разрыв мощности при запуске дизеля в отрицательных температурах и возникновении нештатных ситуаций.

Таблица 3.2 – Технические характеристики компрессорной установки КВ-10/8

Параметр	Ед. изм.	Значение
Производительность, н.у.	м3/мин	8,0...12,0
Давление конечное ном.	МПа	0,8...1,0
Мощность привода	кВт	63,0...103,0
Частота вращения	об/мин	2200
Расход масла	г/час	2,1...2,52
Объем топливного бака	л	150
Температура эксплуатации	°С	+1 (-30)...+35 (+45)
Сжимаемый газ	-	Воздух
Охлаждение	-	Воздушное

3.2 Пример расчета производительности для режима 5

После проведения испытаний в 5 разных режимах, описанных в п. 2.3, производится расчет производительности, соответственно по формулам 2.17 и 2.18 (п 2.2).

Испытания компрессорной установки АКВ-0,81/1 в режиме 5:

Исходные данные : $T_{ст} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_{ст} = 101,325 \text{ кПа}$ (Стандартные условия для определения объема газов - ГОСТ 2939-63).

Таблица 3.3 – Измеренные параметры

$p_{атм}, \text{кПа}$	$T_{атм}, \text{ }^\circ\text{C}$	$p_1 \text{ абс, атм}$	$p_2 \text{ абс, атм}$	$T_1, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_2, \text{ }^\circ\text{C}$	$V_1, \text{ м}^3$	$\tau, \text{ с}$
98,5	23	1	11	23	26	1	735

Показатель политропы n:

$$n = \frac{1}{1 - \log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \frac{T_2}{T_1}} = \frac{1}{1 - \log\left(\frac{11}{1}\right) \frac{299}{296}} = 1,004 \quad (2.13)$$

Конечный объем газа V_2 :

$$V_2 = V_1 \sqrt[n]{\frac{p_1}{p_2}} = 1^{1,004} \sqrt[11]{\frac{1}{11}} = 0,092 \quad (2.16)$$

Для пересчета фактической производительности Q_ϕ к производительности, приведенной к стандартным условиям, Q_π подставляются численные значения показателя политропы n и конечного объема газа V_2 :

$$Q_\pi = \frac{V_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1 - \log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \frac{T_2}{T_1}} \right)}{\tau \cdot \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1 - \log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \frac{T_2}{T_1}}} \cdot \frac{T_{\text{атм}}}{T_2} \cdot \frac{p_{\text{ст}}}{p_{\text{атм}}} =$$

$$= \frac{1 \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{11} \right)^{1 - \log\left(\frac{11}{1}\right) \frac{299}{296}} \right)}{735 \cdot \left(\frac{1}{11} \right)^{1 - \log\left(\frac{11}{1}\right) \frac{299}{296}}} \cdot \frac{293}{299} \cdot \frac{101}{98,5} = 0,82 \quad (2.17)$$

По такому же принципу проводится расчет для 5 режимов наполнения ресивера, для 2-ух компрессорных установок.

3.3 Результаты испытаний

После проведения испытаний для каждого из 5 режимов (п. 2.3), производится пересчет производительности, результаты которого отображены в таблице 3.4 для компрессорной установки АКВ-0,81/1 и в таблице 3.5 – для КВ-10/8.

Таблица 3.4 – Результаты испытаний АКВ-0,81/1

Режим	1	2	3	4	5
$p_{атм}$, кПа	-	-	98,5	98	98,5
$T_{атм}$, °С	-	-	22	22	23
p_1 абс, атм	1				
p_2 абс, атм	11				
T_1 , °С	-	-	22	22	23
T_2 , °С	-	-	26	25	26
V_1 , мЗ	1				
τ , с	695	723	734	735	735
$Q_{факт}$, мЗ/мин	0,863	0,829	-	-	-
$Q_{ст\ усл\ всас}$, мЗ/мин	-	-	0,817	0,826	0,822
$Q_{рм}$, мЗ/мин	0,815				

По данным из таблицы 3.4 строится график (рисунок 3.3) опишем полученный результат:

В режиме 1: температура не измеряется принимается что она равна $T_1 \approx T_2$, а коэффициент политропы $n = 1$, рабочее давление на машине не поддерживается. Величина приведенной производительности отличается от показаний расходомера больше чем на 5 %, что противоречит железнодорожному стандарту.

В режиме 2, наглядно видно, что приведенная производительность приблизилась к показаниям расходомера, т.к. на машине поддерживается рабочее давление, а ресивер накачивается очень медленно. Если накачивать ресивер сжатым воздухом медленно, тогда температура в конце и в начале процесса сжатия будет примерно равна $T_1 \approx T_2$, а коэффициент политропы $n = 1$.

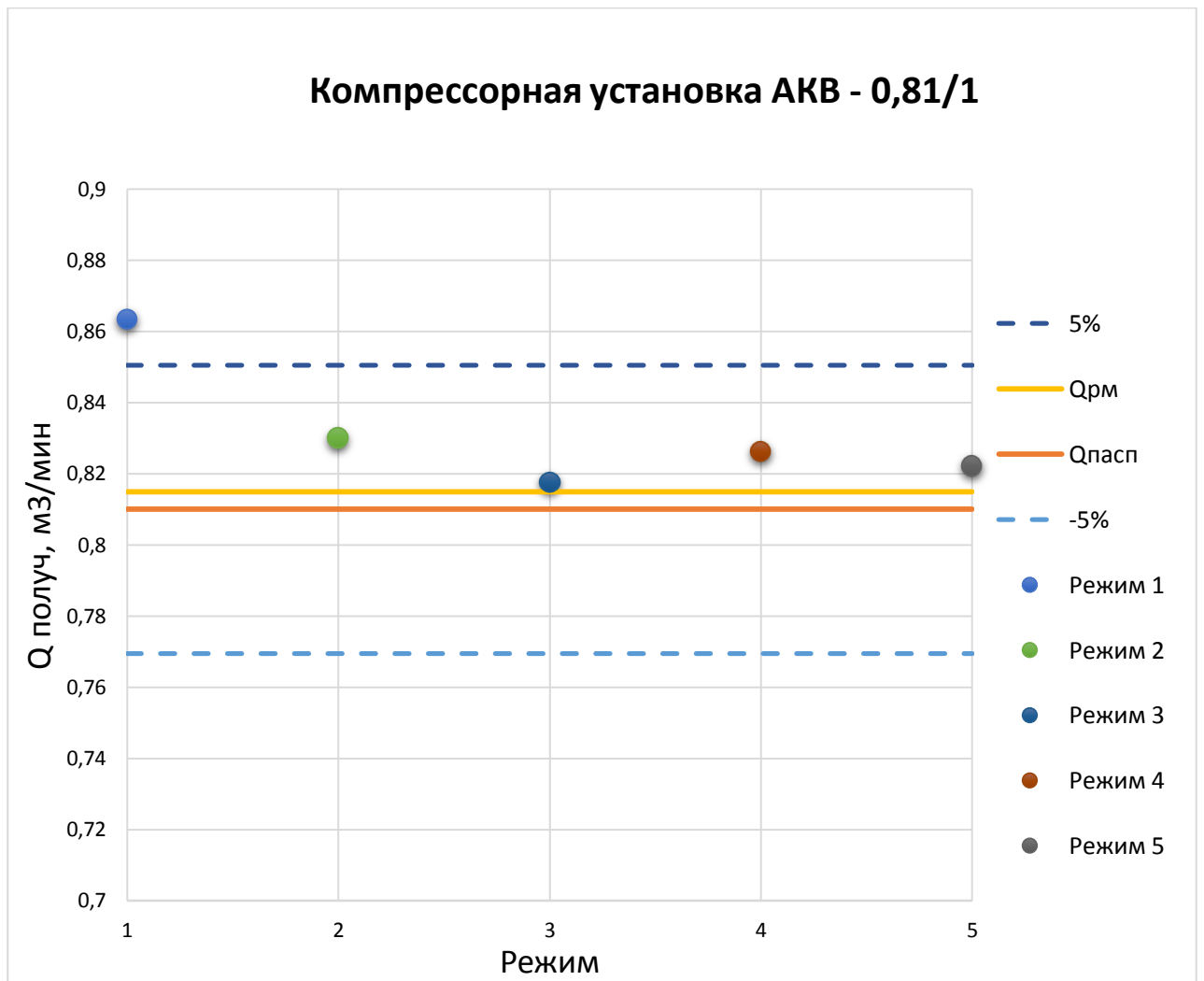


Рисунок 3.3 – Зависимость точности измерения от режима наполнения

В режимах 3, 4 и 5 приведенная производительность несущественно отличается от производительности измеренной расходомером. Исходя из этого можно сделать вывод, что эффект от измерения температуры есть, а от способа измерения температуры в данном эксперименте нет, точность практически не повышается. Величина приведенной производительности остается в пределах 5-6 % от показаний расходомера. Качественно отразим это в таблице 3.5, найдя процентное соотношение приведенной производительности от показаний расходомера:

Таблица 3.5 – Расхождение полученной производительности от расходомера

Режим	1	2	3	4	5
$\Delta, \%$	5,60	1,79	0,30	1,36	0,87

Среднее время наполнения $\tau_{\text{средн}} = 724,4$ сек

Изменение температуры в процессе сжатия $\Delta T = 3 \dots 4$ °С

Как видно, из рисунка 3.3 разница между измерением температуры стенки ресивера (режим 3), температуры газа в трубопроводе (режим 4) и температуры газа внутри ресивера (режим 5) не существенна.

Рассмотрим испытания, проведенные на компрессорной установке КВ-10/8. По данным из таблицы 3.6 строится график (рисунок 3.4) опишем полученный результат:

Таблица 3.6 – Результаты испытаний КВ-10/8

Режим	1	2	3	4	5
$p_{\text{атм}}$, кПа	-	-	98	98,5	98,5
$T_{\text{атм}}$, °С	-	-	28	29	29
p_1 абс, атм	1				
p_2 абс, атм	7				
T_1 , °С	-	-	28	29	29
T_2 , °С	-	-	44	46	45
V_1 , м ³	3,2				
τ , с	95	104	106	108	106
$Q_{\text{факт}}$, м ³ /мин	12,12	11,07	-	-	-
$Q_{\text{ст усл всас}}$, м ³ /мин	-	-	10,04	9,74	9,99
$Q_{\text{рм}}$, м ³ /мин	9,96				

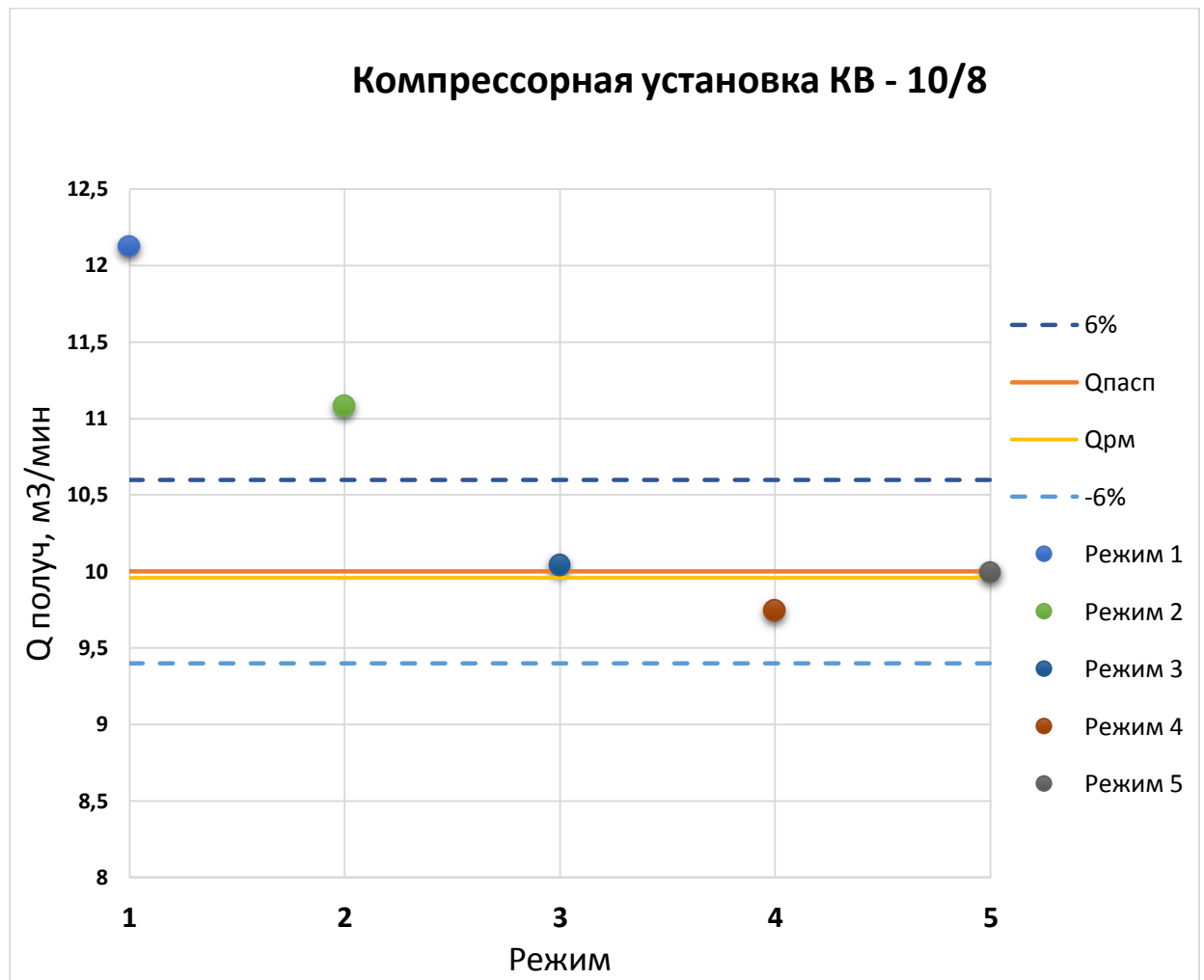


Рисунок 3.4 – Зависимость точности измерения от режима наполнения

Таблица 3.7 – Расхождение приведенной производительности от РМ

Режим	1	2	3	4	5
Δ , %	17,86	10,08	0,81	-2,24	0,34

Среднее время наполнения $\tau_{\text{средн}} = 103,8$ сек

Изменение температуры в процессе сжатия $\Delta T = 16 \dots 17$ °С

На рисунке 3.4, отчетливо видно, что режим 1 и 2 значительно превысили 6% от показаний расходомера, при высокой производительности компрессора по отношению к объему ресивера (в данном случае производительность составляла 10 м³/мин, а объем ресивера 3,2 м³) изменение температуры имеет большую роль. Если измерить температуру не представляется возможным, необходимо очень медленно наполнять ресивер, для того чтобы изменение температуры в процессе сжа-

тия ΔT не превышало 4 °С. В данном случае ресивер наполнялся не больше двух минут, за это время не успевает установиться тепловой баланс, в связи с этим связана и высокая погрешность данного метода.

В режимах 3, 4 и 5 приведенная производительность близка к показаниям расходомера. Это означает, что измерение температуры, при быстром наполнении ресивера, проводить необходимо, тогда, как способ измерения температуры не имеет существенного влияния.

3.4 Анализ влияния человеческого фактора

В ходе исследования было обнаружено 2 характерных режима наполнения ресивера:

1. Быстрое наполнение (около 2 минут) с компрессорной установкой КВ-10/8 и ресивером, объем которого равен 3,2 м³. С разогревом сжатого воздуха (ресивера).
2. Медленное наполнение (около 10 минут) с АКВ-0,81/1 и ресивером, объем которого равен 1 м³ с практическим отсутствием разогрева воздуха (установившемся теплообменом).

По результатам расчетов, медленным режимом можно считать такой режим, при котором время наполнения ресивера превысило 10 минут.

Проанализируем возникающую ошибку измерений, если при проведении испытаний допускается ошибка измерений в двух случаях:

1. Температура отличается на 1 °С, при прочих равных условиях

$$\Delta_T = \frac{Q_{25} - Q_{26}}{Q_{25}} \cdot 100\% \quad (2.20)$$

где Q_{25} – производительность, посчитанная при температуре в точке измерения производительности $T_2 = 25$ °С, м³/мин;

Q_{26} – производительность, посчитанная при температуре в точке измерения производительности $T_2 = 26$ °С, м³/мин;

$$\Delta_T = \frac{0,828 - 0,822}{0,828} \cdot 100\% = 0,7 \%$$

Таблица 3.8 – Анализ погрешности измерения температуры

$T_2, ^\circ\text{C}$	n	$Q_{\text{ст усл всас}}, \text{м}^3/\text{мин}$	$\Delta_T, \%$
25	1,0028	0,828	0,7
26	1,0042	0,822	

2. Время наполнения отличается на 1 секунду, при прочих равных условиях.

Для компрессорной установки АКВ-0,81/1, во время испытаний в режиме 5, были получены следующие значения:

$$\Delta_\tau = \frac{Q_{734} - Q_{735}}{Q_{734}} \cdot 100\%$$

где Q_{734} – производительность, посчитанная при времени наполнения $\tau = 734$ с м³/мин;

Q_{735} – производительность, посчитанная при времени наполнения $\tau = 735$ с м³/мин;

$$\Delta_\tau = \frac{0,823 - 0,822}{0,823} \cdot 100\% = 0,12 \%$$

Таблица 3.9 – Анализ погрешности измерения времени

$\tau, \text{с}$	n	$Q_{\text{ст усл всас}}, \text{м}^3/\text{мин}$	$\Delta_\tau, \%$
734	1,0042	0,823	0,12
735	1,0042	0,822	

Анализ влияния человеческого фактора показал, что ошибка измерений (температуры на 1 °С) и времени наполнения (на 1 секунду), при прочих равных условиях не имеет существенного значения, т.к. погрешности Δ_T и Δ_τ оказалась очень малы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования зависимости производительности от режимов наполнения ресивера установлено, что все режимы по влиянию на результаты измерений можно разделить на 2 группы:

1 группа – быстрое наполнение (до 2-х минут), приводящее к ощутимому росту температуры воздуха в ресивере (до 20 °С), без учета которой результаты измерений отклоняются от показаний расходомера, более чем на 17 %.

2 группа – медленное наполнение (от 10 минут), позволяющее установиться теплообмену воздуха в ресивере с окружающей средой и не приводящее к ощутимому росту температуры воздуха в ресивере (до 4 °С), при этом результаты измерений отклоняются от показаний по расходомеру менее чем на 6 %.

В случае быстрого наполнения в обязательном порядке следует контролировать температуру. Причем способ её контроля не имеет решающего значения (внутри ресивера, на входном патрубке ресивера, температура стенки ресивера), а т.к. погрешности отличаются не более, чем на 2 %, а важен сам факт контроля температуры.

В случае медленного наполнения допустимо не контролировать температуру воздуха, приняв начальное и конечное значение равными температуре окружающей среды. Это дает отклонение от показаний по расходомеру до 6 %.

Температура сжатого воздуха служит важным фактором точности определения производительности, позволяющим, обеспечить отклонение от показаний расходомера в пределах 3 %.

Несмотря на это, на предприятиях, эксплуатирующих компрессорную технику наибольшее распространение получил простой режим быстрого наполнения без контроля температуры и без поддержания на компрессорной установке постоянного давления (режим 1).

По результатам исследований оптимальным режимом следует считать режим 3, т.к. он обеспечивает не только близкое совпадение с показаниями расходомера (расхождение менее 1 %), но и позволяет сохранить пневматическую сеть и ресивер

в исходном состоянии, благодаря применению бесконтактного термометра, исключая необходимость врезки термометров, что является экономически наиболее целесообразным. Увеличение точности измерения температуры воздуха при этом не влияет на точность определения производительности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коммерческий учёт газа. Различные методы измерения расхода – Режим доступа: <https://pasko.ru/node/1846>
2. Режим доступа: <http://kipiavp.ru/pribori/elektromagnitniy-rashodomer.html>
3. Нубарян С. М. Средства коммерческого учета энергоносителей / Курс лекций. – Х.: 2009. – 153 с.
4. Золотаревский С. А. Современные промышленные узлы коммерческого учета газа. Краткая история и ближайшие перспективы / С. А. Золотаревский, А. С. Осипов // Энергоанализ и энергоэффективность. — 2005. — № 4-5.
5. Золотаревский С. А. К вопросу о выборе узлов коммерческого учета газа / С. А. Золотаревский, А. С. Осипов // Газ России. — 2006. — № 1 – 25 с.
6. Coriolis G. Sur les équations du mouvement relative des systèmes de corps (фр.)// Journ. Ecole polytechn. — 1835. — Vol. 15, no 24. – 142–154 с.
7. Абрамов Г. С. Вихревые счетчики газа промышленного назначения. Опыт разработки, производства и эксплуатации / Г. С. Абрамов, М. И. Зимин // АТиС в НП. – 2001 – 14-16 с.
8. Золотаревский С.А. О применимости вихревого метода измерения расхода для коммерческого учета газа. // Энергоанализ и энергоэффективность. – 2006.- 57-59 с.
9. Кратиров Д.В., Мекешкин В.М., Михеев Н.И., Молочников В.М. Измерение расхода вихревым расходомером в условиях неравномерности потоков// Материалы докладов национальной конференции по теплоэнергетике НКТЭ. – Казань. – 2006. – 121-124 с.
10. Сакун И. А. Винтовые компрессоры // Л.: Машиностроение, 1970. - 400 с.
11. Титова И. П. Технические средства автоматизации // М.: МИТХТ им М. В. Ломоносова, 2014. –80 с.
12. Сайт Добыча нефти и газа – Режим доступа: <http://neftandgaz.ru/?p=1882>
13. Сайт Расходомеры – Режим доступа: <http://расходомер.com.ua/>

- 14.ГОСТ 2939-63 Газы. Условия для определения объема. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200001401>.
- 15.Бурцев С.И Влажный воздух. Состав и свойства / С.И. Бурцев. – Спб.: СПбГАХИТ, 1998. – 146 с.
- 16.Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ / П. П. Кремлевский. – СПб.: Политехника, 2004. – 412 с.
- 17.Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов по специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов» / В.П. Преображенский. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.
- 18.МИ 3235-2009 ГСИ. Счетчики газа турбинные, ротационные и вихревые в составе узлов учета газа. Методика определения погрешности (суммарной неопределенности) измерений объема газа в реальных условиях эксплуатации узлов учета. – М, 2009 – 49 с.
- 19.ГОСТ 20073-81 Компрессоры воздушные поршневые стационарные общего назначения. Правила приемки и методы испытаний.
20. Потапов В.Я. Конструкции винтовых компрессоров : учебное пособие / В.Я. Потапов, Ю. Н. Миняев, В. Ф. Копачёв. – Екатеринбург: УГГУ, 2005. – 48 с.
21. Технологии измерений расхода [Электронный ресурс] / Режим доступа – <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/>
- 22.Катыс Г. П. Массовые расходомеры / Г. П. Катыс. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 88 с.
- 23.Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ / П. П. Кремлевский. – СПб.: Политехника, 2002. – 409 с.
- 24.Хансуваров К.И. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара / К.И. Хансуваров, В.Г. Цейтлин. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 287 с.
- 25.Друзьякин И.Г. Технические измерения и приборы / И.Г. Друзьякин, А.Н. Лыков. – Пермь: Издательство Пермского государственного технического университета, 2008. – 412 с.

26. Нубарян С.М. Контрольно-измерительные приборы в теплотехнических измерениях / С.М. Нубарян. – Харьков: ХНАГХ, 2006. – 283 с
27. Клаассен К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике / К.Б. Клаассен. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.
28. Промышленные приборы и системы автоматики: справочник / под ред. В.В. Черенкова. – М.: Изд-во ЭАИ, 1987.
29. Фарзани Н.Г. Технологические измерения и приборы: учеб. Для вузов / Н.Г. Фарзани. – М.: Высшая школа, 1989. – 456 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 – Средства измерений

Наименование	Типоразмер (марка)	Диапазон измерений	Класс точности	Погрешность
Манометр	«Росма» ТМ-610 МТИ	0...1,6 МПа	0,4	±0,4 %
Термометр	«Росма» БТ-51.211	0...120 °С	2,5	±2,5
Расходомер газовый многопараметрический	Метран-331-520-0,5-10-С-К1	0,32...43,0 м ³ /мин; 0,05...0,4 МПа; -20...+60 °С	1	±1,0
Гигрометр	ВИТ-2	+15...+40 °С	-	±0,2 °С
Барометр-анероид	БАММ-1	80-106 кПа	-	±0,2 кПа
Пирометр	Optris MS	-32...+420 °С	1	-

Примечание: все средства измерений включены в Госреестр СИ. На момент испытаний имеют действующие свидетельства (знаки) поверки.