



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Институт повышения квалификации
и переподготовки

Кафедра «Металлургия и технологии обработки материалов»

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И ИЗМЕРЕНИЯ

ПРАКТИКУМ

**для слушателей специальности переподготовки
1-42 01 71 «Металлургическое производство
и материалобработка»
заочной формы обучения**

Гомель 2021

УДК 621.1.002.56(075.8)
ББК 31.32я73
Т34

*Рекомендовано кафедрой «Металлургия и технологии
обработки материалов» ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 2 от 16.02.2021 г.)*

Составитель *О. В. Герасимова*

Рецензент: доц. каф. «Технология машиностроения» ГГТУ им. П. О. Сухого
канд. техн. наук, доц. *Г. В. Петришин*

Т34 **Теплотехнические** приборы и измерения : практикум для слушателей заочного отделения специальности переподготовки 1-42 01 71 «Металлургическое производство и материалобработка» заоч. формы обучения / сост.: О. В. Герасимова. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2021. – 41 с. Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Приведены практические работы для курса «Теплотехнические приборы и измерения».

Для слушателей специальности 1-42 01 71 «Металлургическое производство и материалобработка» ИПКиП.

УДК 621.1.002.56(075.8)
ББК 31.32я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2021

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Классификация методов и средств измерения

Измерение - один из способов познания природы, который способствует внедрению в химическую и нефтеперерабатывающую промышленность новых научно-технических открытий и представляет собой единый процесс совместной работы чувствительных элементов и вторичных измерительных устройств.

Измерением называется процесс получения опытным путем числового соотношения между измеряемой величиной и некоторым ее значением, принятым за единицу сравнения.

Результат измерения можно представить следующим выражением:

$$R=Q/q, \quad (1)$$

где Q -измеряемая физическая величина; q - единица измерения; R - результат измерения или численное значение измеряемой величины.

По системообразующим признакам измерения можно классифицировать по:

- точности - равноточные и неравноточные;
- числу измерений - однократные и многократные;
- изменению измеряемой величины от времени - статические и динамические;
- назначению - технические и метрологические;
- выражению результата - абсолютные и относительные;
- методам получения результата - прямые, косвенные, совместные, совокупные.

Средствами измерений называются технические приборы, используемые при измерениях и имеющие нормированные метрологические характеристики - характеристики свойств средств измерений, оказывающие влияние на результаты и погрешности измерений.

Они включают: меры, измерительные приборы, измерительные установки, измерительно-вычислительные комплексы, измерительные преобразователи, измерительные устройства, измерительные принадлежности и средства сравнения.

$$G = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)}. \quad (2)$$

Мера - средство измерений, предназначенное для воспроизведения

физической величины заданного размера (например, гиря - это мера массы).

Измерительный прибор - это средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Измерительный прибор, показания которого являются непрерывной функцией изменений измеряемой величины, называют *аналоговым измерительным прибором*.

Самопишущий измерительный прибор - регистрирующий прибор, в котором предусмотрена запись показаний в форме диаграммы. Регистрирующий прибор, в котором предусмотрено печатание показаний в цифровой форме называют печатающим.

Измерительный прибор прямого действия - прибор, в котором предусмотрено одно или несколько преобразований сигнала измерительной информации в одном направлении, без применения обратной связи, например, ртутно-стеклянный термометр.

Измерительный прибор называют *интегрирующим измерительным прибором*, если подводимая величина подвергается интегрированию по времени или другой независимой величине,

Измерительным преобразователем называют средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки или хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем.

1.1 Понятие о температуре и температурных шкалах

Международная температурная шкала является практическим осуществлением термодинамической стоградусной температурной шкалы, у которой температура плавления льда и температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении соответственно обозначены через 0° и 100° .

Основные постоянные точки МТШ и присвоенные им числовые значения температур при нормальном атмосферном давлении приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Числовые значения основных постоянных точек МТШ

Температура равновесия	Постоянные точки МТШ	Значение температуры, $^\circ\text{C}$
между жидким и газообразным кислородом	точка кипения кислорода	- 182,96 $^\circ$
между льдом и водой, насыщенным воздухом	точка плавления льда	0.000 $^\circ$

между жидкой водой и ее паром	точка кипения воды	100,000°
между жидкой серой и ее паром	точка кипения серы	414,60°
между твердым и жидким серебром	точка затвердевания серебра	961,93°
между твердым и жидким золотом	точка затвердевания золота	1064,43°

Для определения значения температуры какого-либо тела необходимо выбрать эталон температуры, то есть тело, которое при определённых условиях, равновесных и достаточно легко воспроизводимых, имело бы определённое значение температуры, которое называют *реперной* точкой соответствующей шкалы температур. Наиболее часто при получении шкалы температур используются свойства воды.

После введения Международной системы единиц (СИ) к применению рекомендованы две температурные шкалы.

Первая - термодинамическая шкала, которая не зависит от свойств используемого вещества (рабочего тела) и вводится посредством цикла Карно. Единицей измерения температуры в этой температурной шкале является один кельвин (1 К). Название дано в честь английского физика Уильяма Томсона (лорда Кельвина) (1824-1907), который разрабатывая эту шкалу сохранил величину единицы измерения температуры такой же, как и в температурной шкале Цельсия.

Вторая рекомендованная температурная шкала - международная практическая (см. табл.1.2).

Таблица 1.2

Международная температурная шкала

Состояние равновесия	Присвоенное значение температуры	
	междунар.	практич.
	T, K	$T, ^\circ C$
Тройная точка водорода	13,81	-259,34
Равновесие между жидкой и газообразной фазами водорода при давлении 33330,6 Па (25/76 норм. атмосферы)	17,042	-256,108
Точка кипения водорода	20,28	-252,87
Точка кипения неона	27,102	-246,-48
Тройная точка кислорода	54,361	-218,789
Точка кипения кислорода	90,188	-182,962
Тройная точка воды	273,16	0,01
Точка кипения воды	373,16	100

Точка затвердевания цинка	692,73	419,58
Точка затвердевания серебра	1235,08	961,93
Точка затвердевания золота	1337,58	1064,43

Эта шкала имеет 11 реперных точек - температуры фазовых переходов ряда чистых веществ, причём значения этих температурных точек постоянно уточняются. Единицей измерения температуры в международной практической шкале также является 1 К.

В настоящее время основной реперной точкой, как термодинамической шкалы, так и международной практической шкалы температур является тройная точка воды.

Эта точка соответствует строго определенным значениям температуры и давления, при которых вода может одновременно существовать в твердом, жидком и газообразном состояниях. Причем, если состояние термодинамической системы определяется только значениями температуры и давления, то тройная точка может быть только одна. В системе СИ температура тройной точки воды принята равной 273,16 К при давлении 609 Па.

По мере развития техники температурных измерений использовались различные температурные шкалы: МТШ-27, МПТШ- 68, МТШ-90 (цифры указывают год международного принятия шкалы).

Международная температурная шкала МПТШ-90 охватывает диапазон от 0,65 К до наивысшей температуры, доступной измерению для монохроматического излучения в соответствии с законом Планка. Она представлена рядом диапазонов, содержащих реперные точки, внутри которых используются определенные типы термометров.

1.1.1 Методы и средства измерения температуры

Температура - один из важнейших параметров технологических процессов. Она обладает некоторыми принципиальными особенностями, что обуславливает необходимость применения большого количества методов и технических средств для ее измерения.

Температурой называют величину, характеризующую тепловое состояние тела, которая может быть определена как параметр теплового состояния. Значение этого параметра обуславливается средней кинетической энергией поступательного движения молекул данного тела. При соприкосновении двух тел, например, газообразных, переход тепла от одного тела к другому будет происходить до тех пор, пока значения средней кинетической энергии поступательного движения молекул этих тел не будут равны.

С изменением средней кинетической энергии движения молекул тела

изменяется степень его нагретости, а вместе с тем изменяются также физические свойства тела.

Термометр - это прибор, применяемый для измерения температуры твердых, жидких и газообразных сред, использующих различные термометрические свойства.

Термометрическими признаками могут быть изменения:
объёма газа или жидкости,
электрического сопротивления тел,
разности электрического потенциала на границе раздела двух проводящих тел и т.д.

Соответствующие этим признакам приборы для измерения температуры (термометры) будут: газовый и ртутный термометры, термометры, использующие в качестве датчика термосопротивление или термопару.

По принципу действия все термометры делятся на следующие группы, которые используются для различных интервалов температур:

1. Термометры расширения от -260 до $+700$ °С, основанные на изменении объемов жидкостей или твердых тел при изменении температуры.

2. Манометрические термометры от -200 до $+600$ °С, измеряющие температуру по зависимости давления жидкости, пара или газа в замкнутом объеме от изменения температуры.

3. Термометры электрического сопротивления стандартные от -270 до $+750$ °С, преобразующие изменение температуры в изменение электрического сопротивления проводников или полупроводников.

4. Термоэлектрические термометры (или пирометры), стандартные от -50 до $+1800$ °С, в основе преобразования которых лежит зависимость значения электродвижущей силы от температуры спая разнородных проводников.

5. Пирометры излучения от 500 до 100000 °С, основанные на измерении температуры по значению интенсивности лучистой энергии, испускаемой нагретым телом,

6. Термометры, основанные на электрофизических явлениях от -272 до $+1000$ °С (термошумовые термоэлектрические преобразователи, объемные резонансные термопреобразователи, ядерные резонансные термопреобразователи).

Часть термометра, преобразующая тепловую энергию в другой вид энергии, называется *чувствительным элементом*.

Различают термометры *контактные* (рис.1.1) и *бесконтактные*. Чувствительный элемент контактного термометра входит в непосредственное соприкосновение с измеряемой средой.

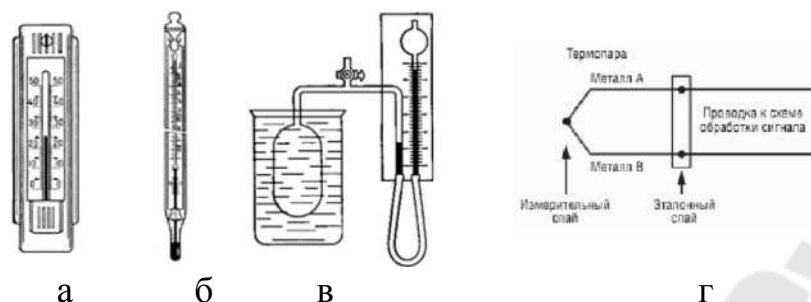


Рис. 1.1. Контактные устройства для измерения температуры: *а* - комнатный термометр с наружной шкалой; *б* - лабораторный термометр с вложенной шкалой; *в* - газовый термометр; *г* - схема термопары

Способу измерения температуры контактным методом присущи определенные недостатки:

- температурное поле объекта искажается при введении в него термодатчика;
- температура преобразователя всегда отличается от истинной температуры объекта;
- верхний предел измерения температуры ограничен свойствами материалов, из которых изготовлены температурные датчики.

Кроме того, ряд задач измерения температуры в недоступных вращающихся с большой скоростью объектах не может быть решен контактным способом.

Бесконтактный способ основан на восприятии тепловой энергии, передаваемой через лучеиспускание и воспринимаемой на некотором расстоянии от исследуемого объема, что относится к достоинствам данного метода.

Однако этот способ менее чувствителен, чем контактный.

Термометры, действие которых основано на измерении теплового излучения, называют пирометрами излучения (ПИ) или просто *пирометрами*.

Разработаны пирометры следующих типов:

- пирометр суммарного (полного) излучения (ПСИ) - измеряется полная энергия излучения;
- пирометр частичного излучения (ПЧИ) - измеряется энергия в ограниченном фильтром (или приемником) участке спектра;
- пирометры спектрального отношения (ПСО) - измеряется отношение энергий фиксированных участков спектра.

Пирометры излучения градуируются по АЧТ (абсолютно черному телу), поэтому при их применении в реальных условиях получаются значения температур, в большинстве случаев отличающиеся от действительных и получившие название условных ($T_{усл}$). Для перехода от

условной температуры к действительной в показания пирометров вводятся соответствующие поправки.

В зависимости от типа пирометра различаются: радиационная, яркостная и цветовая температуры.

В зависимости от решаемых задач, вида материала линзы (интервала пропускаемых длин волн), чувствительности приемника излучения, реализуются конкретные конструкции приборов в виде стационарных или переносных ПИ, в состав которых входят те или иные структурные составляющие.

1.2 Измерение давления, разрежения и разности давлений

1.2.1 Общие сведения о давлении

Важнейшим параметром, влияющим на ход процессов в химической технологии, является давление: абсолютное, атмосферное, избыточное и вакуумметрическое.

Атмосферное давление имеет переменную величину, так как создается массой воздушного столба земной атмосферы.

Избыточное давление находят как разницу между абсолютным и атмосферным давлениями.

Вакуумметрическое давление (разрежение) - такое состояние газа, при котором его давление меньше атмосферного, и количественно определяется разностью между величиной атмосферного и абсолютного давлений внутри вакуумной системы.

За единицу давления в системе СИ принято давление, которое создается силой в 1 ньютон, равномерно распределенной по поверхности в 1 м^2 , и называется паскалем (Па). Для измерения средних и высоких давлений применяют кратные единицы: килопаскаль (кПа) и мегапаскаль (МПа).

В движущихся средах различают: полное, статическое, динамическое давление.

Статическое - может быть избыточным и вакуумметрическим, в частном случае оно равно атмосферному и зависит от запаса потенциальной энергии газовой (жидкостной) среды.

Динамическое давление обусловлено скоростью движения потока газа (жидкости) и определяется через скоростной (динамический) напор.

Полное давление движущейся среды представлено суммой статического $p_{ст}$ и динамического $p_{д}$ давлений.

1.2.2 Единицы давления

Из числа допускаемых к применению единиц давления предпочтительной является единица международной системы (СИ) паскаль (Па). Паскаль - это давление силы в один ньютон на площадь в один квадратный метр (Н/м^2).

До введения единицы давления системы СИ в физической и технической литературе пользовались единицей давления системы СГС: дина на квадратный сантиметр ($1 \text{ дин/см}^2 = 0,1 \text{ Па}$) и внесистемной единицей давления бар ($1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 101970 \text{ кгс/м}^2 = 1,0197 \text{ кгс/см}^2$).

Допускаются к применению единица давления системы МКГСС килограмм-сила на квадратный метр (кгс/м^2) и внесистемные единицы: килограмм-сила на квадратный сантиметр (кгс/см^2), которую называют технической атмосферой (ат), миллиметр водяного столба (мм вод. ст.) и миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.). При измерении давления жидкостным столбом последний должен быть отнесен для воды к 4°C , ртути - к 0°C и нормальному ускорению свободного падения, равному $9,80665 \text{ м/с}^2$. Применение последних единиц давления особенно удобно при пользовании жидкостными приборами.

Кроме рассмотренных выше единиц давления применяют физическую атмосферу, равную нормальному давлению атмосферного воздуха 760 мм рт. ст. при 0°C и нормальном ускорении свободного падения ($760 \text{ мм рт. ст.} = 101,325 \text{ кПа} = 1,0332 \text{ кгс/см}^2$).

Соотношения между основными применяемыми единицами давления приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Единицы измерения давления и соотношение между ними

Единицы измерения	Па	Бар	кгс/см ²	мм рт. ст.
1 Па	1	10^{-5}	$1,019710^{-5}$	$7,5006 \cdot 10^{-3}$
1 Бар	10^5	1	1,0197	750,06
1 кгс/см ²	$9,8066 \cdot 10^4$	0,98066	1	735,56
1 мм рт. ст.	133,32	$13332 \cdot 10^{-3}$	$1,3595 \cdot 10^{-3}$	1

1.2.3 Виды и принцип работы манометров

Давление, характеризуя внутреннюю энергию среды (жидкость или газ), является одним из основных параметров состояния. Это широкое понятие, которое определяет нормально распределенную силу, действующую со стороны одного тела на единицу поверхности другого.

Наименования приборов для измерения различных типов давления представлены в таблице 1.4.

Манометры, вакуумметры и дифференциальные манометры, предназначенные для измерения небольшого давления, разрежения и разности давлений газовых сред (до 40 кПа), называют соответственно напоромерами, тягомерами и тягонапоромерами. Для высокоточных измерений малых давлений (не выше 4,0 кПа) применяют микроманометры.

Классификация приборов для измерения давления представлена рядом групп.

Таблица 1.4

Наименования приборов для измерения давления

Наименование прибора	Область применения прибора
Барометры	для измерения атмосферного давления
Манометры	для измерения избыточного давления
Вакуумметры	для измерения вакуумметрического давления
Дифференциальные манометры (дифманометры)	для измерения разности (перепадов) давления
Мановакуумметры	для измерения избыточного и
Манометры абсолютного давления	для измерения давления, отсчитываемого от абсолютного нуля

Группа первая - жидкостные манометры (измеряемое давление уравнивается давлением столба жидкости соответствующей высоты (рис. 1.2).

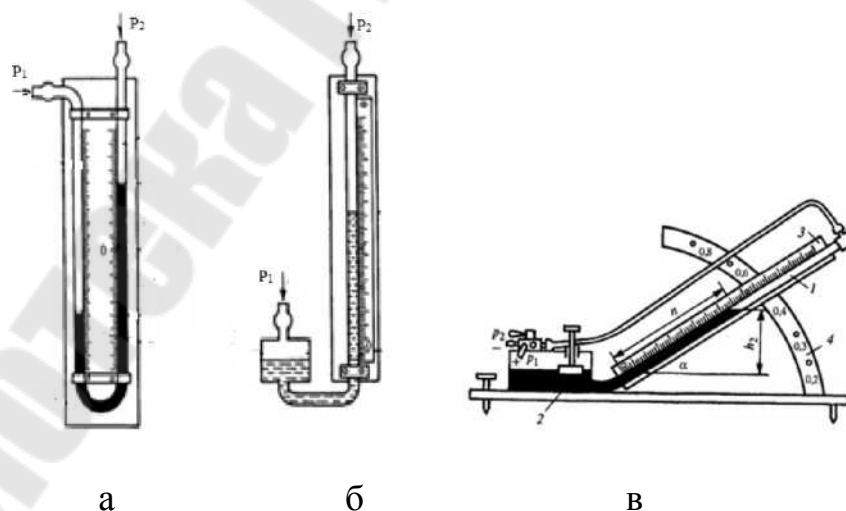


Рис. 1.2. Схемы жидкостных манометров: двухтрубного (а); однострубно (б); микроманометра с наклонной трубкой (в): 1,2 - вертикальные сообщающиеся стеклянные трубки; 3 - шкала; 4 - шкальная пластинка

В этих приборах используется принцип сообщающихся сосудов, в которых уровни рабочей жидкости совпадают при равенстве давлений над ними. В качестве рабочей жидкости возможно использование ртути, спирта, трансформаторного масла и воды. При неравенстве уровней жидкость занимает такое положение, при котором избыточное давление в одном из сосудов уравнивается гидростатическим давлением избыточного столба жидкости в другом.

Большинство жидкостных манометров имеют видимый уровень рабочей жидкости, по положению которого определяется значение измеряемого давления. Эти приборы используются в лабораторной практике и в некоторых отраслях промышленности.

Для измерения атмосферного давления применяются *барометры*, наиболее распространенными из которых являются чашечные барометры с ртутным заполнением, отградуированные в мм рт. ст. Принцип действия *компрессионных манометров или манометров Мак-Леода* основан на использовании закона Бойля-Мариотта, согласно которому для фиксированной массы газа произведение объема на давление при неизменной температуре представляет постоянную величину.

Нижний предел измерения компрессионных манометров составляет 10^{-3} Па (10^{-5} мм рт. ст.), погрешность не превышает $\pm 1\%$. У приборов пять диапазонов измерения и они охватывают давления до 10^3 Па.

Достоинствами рассмотренных жидкостных манометров и дифманометров являются их простота и надежность при высокой точности измерений.

Группа вторая - *деформационные приборы* (измеряемое давление определяется по величине деформации различных чувствительных упругих элементов или по развиваемой ими силе).

Деформационные манометры в зависимости от конструкции чувствительного элемента (рис. 1.3) делятся на *трубчатые, мембранные и сильфонные*.

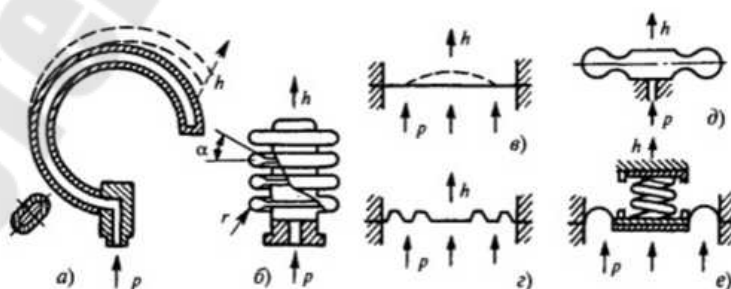


Рис. 1.3. Упругие чувствительные элементы деформационных манометров: а) - трубчатые пружины; б) - сильфоны; в, г) - плоские и гофрированные мембраны; д) - мембранные коробки; е) - вялые мембраны с жестким центром

Пружинные показывающие манометры (рис. 1.4) выпускаются с верхним пределом измерения от 0,1 МПа (1 кгс/см²) до 103 МПа (104 кгс/см²) в соответствии со стандартным рядом. Пружинные вакуумметры имеют диапазон измерения - 0,1...0 МПа, а мановакуумметры при нижнем пределе измерения - 0,1 МПа имеют верхний предел измерения по избыточному давлению от 0,1 до 2,4 МПа.

Образцовые показывающие пружинные манометры имеют класс точности 0,15; 0,25 и 0,4; рабочие 1,5; 2,5; 4, рабочие повышенной точности 0,6 и 1.

Простейший трубчатый манометр (рис. 1.5) имеет полую, изогнутую по дуге трубку, один конец которой присоединён к объёму, где измеряется давление, второй, запаянный конец – к рычагу передаточного механизма. При изменении давления трубка деформируется, перемещение её конца через передаточный механизм сообщается стрелке, которая показывает давление по шкале.



Рис. 1.4. Пружинный показывающий механический манометр: 1 - одновитковая трубчатая пружина; 2 - держатель; 3 - пробка; 4 – поводок; 5 - зубчатый сектор; 6 - шестерня; 7 - стрелка

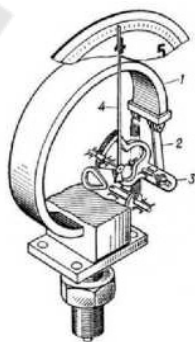


Рис. 1.5. Трубчатый манометр ММ-40: трубка; 2 - рычаг передаточного механизма; 3 - передаточный механизм; 4- стрелка

Пределы измерений деформационных манометров охватывают широкий диапазон давлений – от 10 Н/м² до 1000 Н/м² (1- 108 мм вод. ст.).

К достоинствам данных приборов можно отнести:

- большой диапазон измерения (от нескольких паскалей до тысячи мегапаскалей);

- простота принципа действия;
- компактность конструкции;
- удобство в эксплуатации.

Группа *третья* - *грузопоршневые* (измеряемое и воспроизводимое давление уравнивается давлением, которое создается массой поршня и грузов). Наиболее распространены грузопоршневые манометры с простым неуплотнённым поршнем (рис. 1.6).

Пространство под поршнем заполнено маслом, которое под давлением поступает в зазор между поршнем и цилиндром, что обеспечивает смазку трущихся поверхностей. Вращение поршня относительно цилиндра предотвращает появление контактного трения. Давление определяется весом грузов, уравнивающих его, и площадью сечения поршня. Изменяя вес грузов и площадь сечения поршня, можно в широком диапазоне менять пределы измерений, при этом погрешности наиболее точных эталонных манометров не более 0,002–0,005 %.

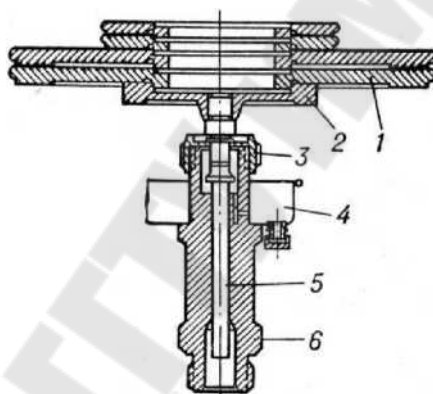


Рис. 1.6. Грузопоршневой манометр МП-60 с простым неуплотнённым поршнем: 1 - грузы; 2 - грузоприёмная тарелка; 3 - ограничитель; 4 - воронка; 5 - поршень; 6 - цилиндр

Кроме цилиндрических поршней, применяют сферические и конические поршни. В так называемых колокольных манометрах роль поршня выполняет колокол, а в манометрах типа «кольцевых весов» – плоская перегородка внутри полого кольца.

Поршневые манометры применяют для градуировки и поверки манометров других типов, при точных измерениях и контроле давления с выходом показаний на цифровой счётчик или с передачей их на расстояние.

Основное преимущество поршневых манометров перед жидкостными заключается в возможности измерения ими больших давлений при сохранении высокой точности. Верхний предел измерения поршневых манометров составляет около $3,5 \text{ Гн/м}^2$ ($3,5 \cdot 10^8$ мм вод. ст.),

при этом высота измерительной установки не превышает 2,5 м (для измерения такого давления ртутным манометром потребовалось бы довести его высоту до 26,5 км).

Группа *четвертая - электрические* (действие прибора основано на изменении электрических свойств некоторых материалов при давлении). Электрические приборы используются главным образом для специальных целей, например, при измерениях сверхвысоких давлений, глубокого вакуума или давлений, пульсирующих с высокой частотой.

Области применения манометров различных типов показаны на рис. 1.7.



Рис. 1.7. Области применения манометров различных типов

1.3 Измерение уровня жидкостей и сыпучих материалов

Виды уровнемеров

Уровнемеры - это специальные устройства, которые используются для определения уровня жидкостей, порошков и других материалов или сырья в определенных резервуарах, в которых они хранятся, или в рабочей среде. Их называют датчиками (сигнализаторами) или же преобразователями уровня. Однако, в отличие от сигнализатора уровня, который меряет только граничные отметки, уровнемеры применяют для измерения общих градаций полного уровня.

На сегодняшний день существует огромное множество уровнемеров с различными функциями и для различных материалов, уровень которых необходимо измерять и контролировать.

Визуальные - являются наиболее простым видом измерителей уровня (рис. 1.10). Их работа основана на принципе сообщающихся сосудов

(аппарат и трубка), а за уровнем жидкости следят напрямую через водомерное стекло.

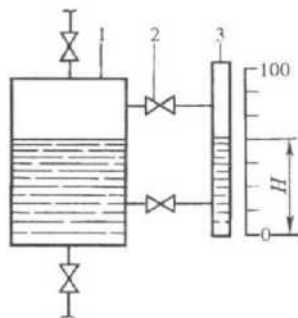


Рис. 1.8. Визуальный уровнемер: 1- аппарат; 2 - запорные вентили; 3 - указательное стекло (трубка); H - высота жидкости в трубке, соответствующая ее уровню в аппарате

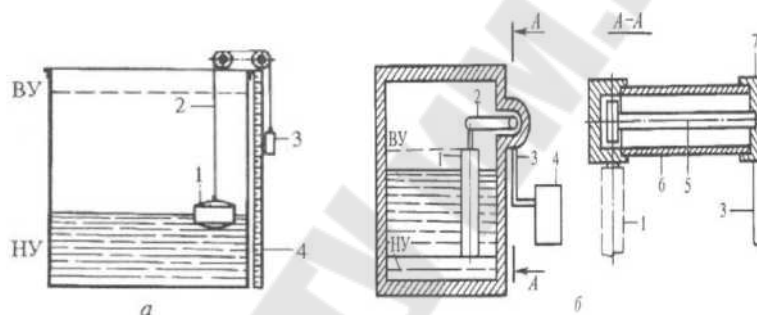


Рис. 1.9. Поплавковые уровнемеры:
a - с плавающим поплавком: (1- поплавок; 2 - гибкий трос; 3 - уравнивающий груз; 4 - шкала); *б* - с тонущим поплавком (1 - буюк; 2 - рычаг; 3 - штанга; 4 - противовес; 5 - вал; 6 - трубка; 7 - доннышко

Механические уровнемеры - отсчет уровня происходит:

S либо по оценке положения предмета на поверхности жидкости относительно двух точек измерений (*поплавковые уровнемеры*), рис. 1.9, *a*;

S либо по оценке уровня жидкости, вытесненной при погружении предмета (закон Архимеда - $F_A = \rho g V$, где ρ - плотность жидкости (газа), g - ускорение свободного падения, а V - объём погружённого тела (*буюковые уровнемеры*), рис 2.11, *б*.

Поплавковые уровнемеры применяют, в основном, при небольшом давлении - до 6,0 МПа и температуре измеряемой жидкости до 300 °С. Область измеряемых значений уровня 0,025-20,0 м. Погрешность измерений составляет 1-2 мм.

Буюковые уровнемеры могут работать при значительных давлениях - до 10 МПа. Они в основном применяются для дистанционного измерения уровня жидкости и имеют на выходе унифицированный электрический или пневматический сигнал. Буюковые уровнемеры могут применяться для

измерения уровня жидкости с плотностями от 600 до 2500 кг/м³ при ее температуре от -40 до +400 °С. Класс точности буйковых уровнемеров 1,0 и 1,5.

Гидростатические уровнемеры - принцип измерения основан на измерении гидростатического давления, создаваемого контролируемой жидкостью. Существует большое число разновидностей гидростатических уровнемеров, которые можно разделить на два основных типа: дифманометрические и пневмометрические уровнемеры. Гидростатические уровнемеры применяют для измерения уровня от 0,025 до 6,3 м при температуре, контролируемой среды до 600 °С и области изменения давления до 25 МПа. Пределы основной погрешности 1-1,5%.

Пневмометрические уровнемеры применяются для измерения уровня агрессивных жидкостей, в которых гидростатическое давление столба жидкости уравнивается давлением воздуха или инертного газа, измеряемого дифманометром.

Существенным преимуществом пневмометрических уровнемеров является независимость их показаний от температуры соединений.

Электрические уровнемеры промышленной специализации делятся на *емкостные* (рис. 1.10, а) и *омические* (рис. 1.10, б). В них измеряемые значения уровня жидкости преобразуются в соответствующие электрические сигналы.

Акустические уровнемеры - принцип действия основан на измерении времени отражения звуковых колебаний от поверхности раздела *газ - контролируемая среда*. Разновидностью акустических уровнемеров являются *ультразвуковые уровнемеры*. Эти приборы позволяют измерять уровень без контакта с контролируемой средой в труднодоступных местах.

Радарные уровнемеры (наиболее современные) - принцип действия основан на измерении времени переотражения от поверхности раздела *газ - контролируемая среда* высокочастотных радиоволн.

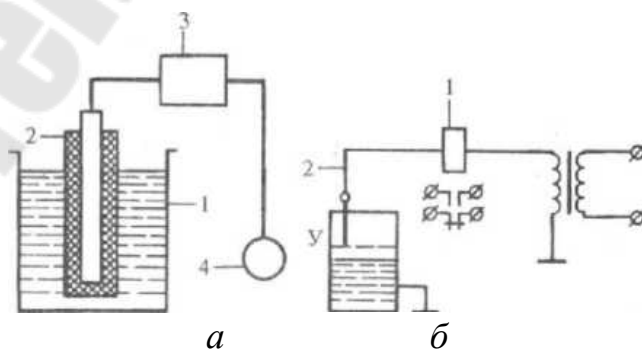


Рис. 1.10. Электрические уровнемеры: а - емкостной (1 - сосуд, 2 - электрод, 3 - электронный блок, 4 - реле); б - омический или кондуктометрический (1 - электромагнитное реле, 2 - электрод)

Последний тип уровнемера позволяет производить измерение уровня, как жидкостей, так и сыпучих тел. При этом его можно использовать и при измерении уровня агрессивных сред, например, кислот, расплавленной серы, аммиака и т.д.

1.4 Приборы для измерения расхода жидкости, газа, пара и тепла

Классификация расходомеров

Расход вещества - это масса или объем вещества, проходящего через данное сечение канала средства измерения расхода в единицу времени. Различают объемный (единицы измерения - м³/с или м³/ч) или массовый расход (кг/ч, т/ч).

Измеряется расход вещества с помощью *расходомеров*, представляющих собой средства измерений или измерительные приборы расхода. Часто расходомеры используют не только для измерения расхода, но и для измерения массы или объема вещества, проходящего через средство измерения в течение любого, произвольно взятого промежутка времени. В этом случае они называются *счетчиками* или расходомерами со счетчиками. Масса или объем вещества, прошедшего через счетчик, определяется по разности двух последовательных во времени показаний отсчетного устройства или интегратора.

По принципу измерений расходомеры классифицируют по следующим основным группам.

1. *Расходомеры переменного перепада давления* (с сужающими устройствами; с гидравлическими сопротивлениями; центробежные; с напорными устройствами; струйные), преобразующие скоростной напор в перепад давления.

2. *Расходомеры обтекания* (расходомеры постоянного перепада - ротаметры, поплавковые, поршневые, гидродинамические), преобразующие скоростной напор в перемещение обтекаемого тела

3. *Тахометрические расходомеры* (турбинные с аксиальной или тангенциальной турбиной; шариковые), преобразующие скорость потока в угловую скорость вращения обтекаемого элемента (лопастей турбинки или шарика).

4. *Электромагнитные расходомеры, преобразующие* скорость движущейся в магнитном поле проводящей жидкости в ЭДС.

5. *Ультразвуковые расходомеры*, основанные на эффекте увлечения звуковых колебаний движущейся средой.

6. *Инерциальные расходомеры* (турбосиловые; кориолисовы; гигроскопический), основанные на инерционном воздействии массы движущейся с линейным или угловым ускорением жидкости.

7. *Тепловые расходомеры* (калориметрические; термомнемометрические), основанные на эффекте переноса тепла движущейся средой от нагретого тела.

8. *Оптические расходомеры*, основанные на эффекте увлечения света движущейся средой (Физо-Френели) или рассеяния света движущимися частицами (Доплера).

9. *Меточные расходомеры* (с тепловыми, ионизационными, магнитными, концентрационными, турбулентными метками), основанные на измерении скорости или состоянии метки при прохождении ее между двумя фиксированными сечениями потока.

Для измерения расхода воды мы используем метод переменного перепада давления и в качестве сужающего устройства выбираем диафрагму.

Измерения расхода воды в соответствии с МИ 1948-88 должны проводиться при соблюдении следующих условий:

характер движения потока на прямых участках трубопроводов до и после сужающего устройства должен быть стационарным;

измеряемое вещество должно заполнять все поперечное сечение трубопровода перед сужающим устройством и за ним;

фазовое состояние потока не должно изменяться при его течении через сужающее устройство;

на поверхностях сужающего устройства не должны образовываться отложения, изменяющие его конструктивные параметры и геометрические размеры;

температура измеряемой среды от 0 до 50°C, давление до 1 МПа.

1.4.1. Описание расходомеров переменного перепада давления

Наиболее распространенными средствами измерений расхода жидкостей и газов (паров), протекающих по трубопроводам, являются *расходомеры переменного перепада давления*, состоящие из стандартного сужающего устройства, дифманометра, приборов для измерения параметров среды и соединительных линий. В комплект расходомерного устройства также входят прямые участки трубопроводов до и после сужающего устройства с местными сопротивлениями.

Сужающее устройство расходомера является первичным измерительным преобразователем расхода, в котором в результате сужения сечения потока измеряемой среды (жидкости, газа, пара) образуется перепад (разность) давления, зависящий от расхода. В качестве стандартных (нормализованных) сужающих устройств применяются измерительные диафрагмы, сопла, сопла Вентури и трубы Вентури.

Диафрагма - тонкий диск с отверстием круглого сечения, центр

которого лежит на оси трубопровода (используются в трубах от 50 мм до 2 м). Достоинствами диафрагм являются: простота изготовления, дешевизна изготовления, простота проверки конструкции. Недостатками являются: малый срок службы, большая остаточная потеря давления (40-60%).

Сопло - выполнено в виде насадки с круглым концентрическим отверстием, имеющим плавную сужающую часть на входе и развитую цилиндрическую часть на выходе. К достоинствам сопел относятся: маленькая потеря давления, способность при одном и том же перепаде давлений измерять больший расход. Недостатками являются: сложность в изготовлении и проверке.

Сопло Венчури - состоит из цилиндрического входного участка, плавно сужающейся части, переходящей в короткий цилиндрический участок, и расширяющейся конической части (диффузора).

Измерительная диафрагма представляет собой диск, установленный так, что центр его лежит на оси трубопровода (рис. 1.13).

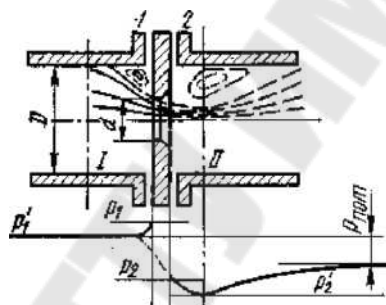


Рис. 1.11. Схема распределения статического давления в потоке при установке в трубопроводе сужающего устройства - диафрагмы: 1 - отверстие для измерения статического давления до сужающего устройства; 2- отверстие для измерения статического давления после сужающего устройства

При протекании потока жидкости или газа (пара) в трубопроводе с диафрагмой сужение его начинается до диафрагмы. На некотором расстоянии за ней под действием сил инерции поток сужается до минимального сечения, а далее постепенно расширяется до полного сечения трубопровода. Перед диафрагмой и после нее образуются зоны завихрения. Давление струи около стенки вначале возрастает из-за подпора перед диафрагмой, а за диафрагмой оно снижается до минимума. Затем давление снова повышается, но не достигает прежнего значения, так как вследствие трения и завихрений происходит потеря давления $p_{\text{пот}}$.

Таким образом, часть потенциальной энергии давления потока переходит в кинетическую. В результате средняя скорость потока в суженном сечении повышается, а статическое давление в этом сечении

становится меньше статического давления перед сужающим устройством. Разность этих давлений (перепад давления) служит мерой расхода протекающей через сужающее устройство жидкости, газа или пара.

В качестве измерительных приборов применяются различные дифференциальные манометры, снабженные показывающими, записывающими, интегрирующими, сигнализирующими и другими устройствами, обеспечивающими выдачу измерительной информации о расходе в соответствующей форме и виде.

По способу отбора давления и дифманометру, расходомерные диафрагмы делятся на:

- камерные
- бескамерные (с точечным отбором).

Более совершенными из них являются камерные устройства.

2 ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Расчет расходной диафрагмы

Для измерения расхода среды используются дроссельные диафрагмы без предварительной градуировки в трубопроводах круглого сечения с диаметром не менее 50 мм при значениях $m = d^2/D^2$ от 0,05 до 0,64 в случае наличия определенной длины прямых участков до и после диафрагмы (d - диаметр отверстия диафрагмы, D - внутренний диаметр трубопровода).

Схема установки в трубопроводе наиболее простого сужающего устройства (СУ) - диафрагмы - в виде тонкого диска с круглым отверстием посередине и изображение характера потока представлены на рис. 3.1. Там же дано распределение статического давления p по длине струи.

Сжатие потока начинается перед диафрагмой и благодаря действию сил инерции достигает наибольшей величины на некотором расстоянии за ней, после чего струя вновь расширяется до полного сечения трубопровода. Перед диафрагмой и за ней в углах образуются зоны с вихревым движением, причем зона вихрей после диафрагмы более значительна, чем до нее. Давление струи около стенки трубопровода (сплошная линия) несколько возрастает за счет подпора перед диафрагмой и понижается до минимума за диафрагмой в точке наибольшего сужения струи, где сечение потока меньше, чем отверстие диафрагмы.

Далее по мере расширения струи давление около стенки снова повышается, но не достигает прежнего значения на величину p_n ввиду наличия безвозвратных потерь на завихрение, удар и трение. Изменение давления струи по оси трубопровода практически совпадает с изменением давления около его стенки, за исключением участка перед диафрагмой и непосредственно в ней, где давление потока по оси трубы понижается

(пунктирная линия). Жидкость должна заполнять все сечение, фазовое состояние ее не должно изменяться.

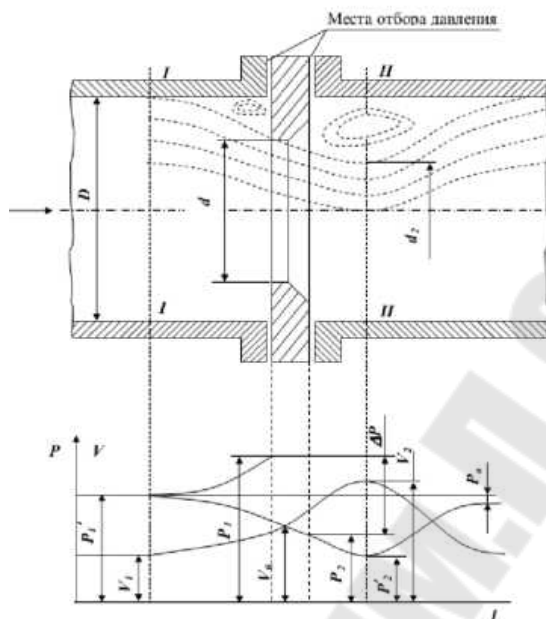
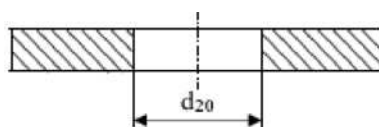


Рис. 2.1. Характер потока и распределение статического давления в трубопроводе при установке сужающего устройства

Дифрагма должна быть выбрана таким образом, чтобы при всех значениях ожидаемого расхода среды коэффициент расхода был величиной постоянной. Минимальное значение критерия Re , при дальнейшем росте которого коэффициент расхода остается постоянной величиной, называется предельным значением критерия Рейнольдса.

При минимальном расходе среды значение критерия Рейнольдса Re должно быть больше $Re_{пред}$.

Дифрагма представляет собой тонкий диск, имеющий круглое отверстие d_{20} , центр которого должен совпадать с центром сечения трубы.



Диаметр отверстия диафрагм независимо от способа отбора представлен следующим соотношением:

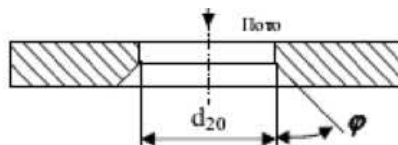
$$D_{20} > 12,5 \text{ мм.}$$

В тех случаях, когда толщина $b < 0,02D_{20}$ можно изготавливать диафрагму без конического расширения к выходу потока.

По толщине диафрагмы $b > 0,02D_{20}$ цилиндрическое отверстие

должно выполняться с коническим расширением к выходу потока и углом наклона:

$$30^\circ < \varphi < 45^\circ.$$

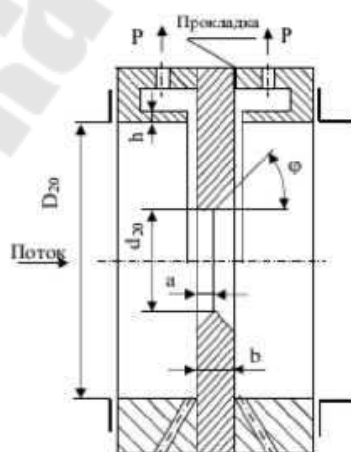


Отверстие диафрагмы цилиндрической формы со стороны входа потока имеет прямоугольную острую кромку. Длина цилиндрической части отверстия должна находиться в пределах:

$$0,005D_{20} < l < 0,02D_{20}.$$

Требования к изготовлению и установке, методика расчета СУ изложены в ГОСТ 8.563.1-97 «Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления» (РД50- 213-80, правила 28-64, 27-54), введенного с 01.01.99 г.

При изготовлении и установке стандартных СУ в трубопроводах должны соблюдаться определенные требования, несоблюдение которых существенно влияют на погрешность измерения расхода. Допустимые диапазоны значений внутренних диаметров трубопроводов при температуре $t = 20^\circ\text{C}$ и относительных площадей диафрагм m должны находиться в пределах:



- для диафрагм с угловым способом отбора Δp (рис. 2.2):

$$50 \text{ м} < D_{20} < 1000 \text{ мм}$$

$$0,05 < m < 0,64$$

Рис. 2.2. Угловой способ отбора Δp

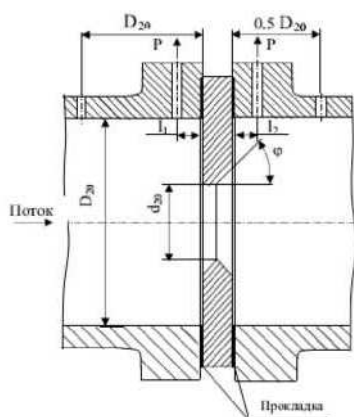


Рис. 2.3. Фланцевый и трехрадиусный способ отбора Δp

- для диафрагм с фланцевым и трехрадиусным способом отбора Δp (рис. 2.3):

$$50 \text{ м} < D_{20} < 760 \text{ мм}, \\ 0,05 < m < 0,56.$$

2.2. Расчета дроссельного устройства

Расчет сужающего устройства заключается в определении его диаметра, при этом должны быть выполнены следующие условия:

- стандартный максимальный перепад давления выбирается как можно больший (обеспечивается постоянство коэффициента α);
- стандартный минимальный перепад давления выбирается как можно меньший (для снижения безвозвратных потерь давления);
- модуль диафрагмы удовлетворяет условию: $0,05 < m < 0,7$;
- погрешность расчета составляет $\pm 0,1\%$.

Диафрагма должна быть выбрана таким образом, чтобы при всех значениях ожидаемого расхода среды коэффициент расхода α был величиной постоянной.

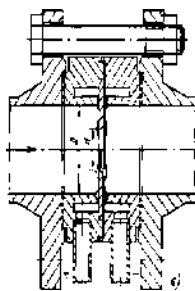


Рис. 2.4. Установка камерной диафрагмы в трубопроводе типа ДК

В камерной диафрагме давления к дифманометру передаются посредством двух кольцевых уравнивающих камер, расположенных в ее корпусе перед и за диском с отверстием, соединенным с полостью трубопровода двумя кольцевыми щелями или группой равномерно расположенных по окружности радиальных отверстий (не менее четырех с каждой стороны диска).

Кольцевая камера перед диском называется плюсовой, а за ним - минусовой. Наличие у диафрагмы кольцевых камер позволяет усреднить давление по окружности трубопровода, что обеспечивает более точное измерение перепада давления.

Точность измерения расхода при помощи диафрагм зависит от степени остроты входной кромки отверстия, влияющей на значение коэффициента расхода α . Кромка не должна иметь скруглений, заусенцев и зазубрин. При $d_{20} < 125$ мм она должна быть настолько острой, чтобы луч света не давал от нее отражения.

Допускаемое смещение оси отверстия сужающих устройств относительно оси трубопровода не должно превышать 0,5-1 мм.

Для изготовления проточной части диафрагм и сопел применяются устойчивые к коррозии и эрозии материалы (нержавеющая сталь, латунь или бронза).

На ободе сужающего устройства или на прикрепленной маркировочной пластинке обычно наносятся: обозначение типа устройства и заводской номер; диаметры d_{20} и D_{20} ; стрелка, указывающая направление потока; марка материала; знаки + и - соответственно со стороны входа и выхода потока. К сужающему устройству прилагается выпускной аттестат, в котором указываются:

наименование и расчетные параметры измеряемой среды; величины, полученные при расчете сужающего устройства (m , α , ϵ , d_{20} и др.);

формула, по которой проверялась правильность расчета;

основные характеристики сужающего устройства и дифманометра.

Основная погрешность диафрагм и сопел составляет $\pm 0,6 - 2,5\%$. С повышением значения m она увеличивается, а с ростом диаметра трубопровода D_{20} - уменьшается.

К расходомерам, применяемым в различных технологических процессах выдвигаются повышенные требования: высокая точность измерений, независимость показаний расходомеров от давления и температуры, расширение диапазонов измерения, повышение безотказности в работе и сроков службы.

Минимальное значение критерия Re , при дальнейшем росте которого коэффициент расхода, α остается постоянной величиной, называется *предельным значением критерия Рейнольдса*.

Исходные данные к работе:
 измеряемая среда - водяной пар,
 температура среды - 190 °С,
 максимальный расход - 1900 кг/ч,
 минимальный расход - 1200 кг/ч,
 максимальное давление - 1,1 МПа,
 минимальное давление - 1,0 МПа,
 материал - чугун.

Расход среды может быть задан в единицах массы G - кг/сек или в единицах объема Q -м/сек. Расчетные формулы для определения расхода среды имеют вид:

$$G = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} ; \quad (3)$$

$$G = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} , \quad (4)$$

где, α - коэффициент расхода; ε - поправочный коэффициент на расширение среды (для газообразных сред); F_0 - площадь проходного сечения диафрагмы, м²; ρ - плотность среды перед диафрагмой, кг/м³; $p_1 - p_2 = \Delta p$ - перепад давления на диафрагме, Па.

1. По величине максимального расхода определяется внутренний диаметр трубопровода по формуле:

$$D = \sqrt{\frac{4G}{\pi w \rho}} , \text{ м}, \quad (5)$$

где w - средняя скорость среды в трубопроводе, м/с.

Значения средней скорости потоков для расчета трубопроводов даны в табл. 2.1.

Исходя из данных таблицы 2.1, принимаем скорость $w=75$ м/с.

Таблица 2.1

Значение средней скорости w потоков для расчета трубопроводов

Протекающая среда	Значения давления, кПа	Средняя скорость, м/с
Жидкости		1 - 2
Газы:		
низкого давления	До 5	2 - 10
среднего давления	5-300	10 - 20

Пар:		
низкого давления	147-157	20 - 40
среднего давления	294-344	40 - 60
высокого давления	До 7654	60 - 80

Из справочных данных значение плотности при данной температуре (190°C) составит $\rho=6,378 \text{ кг/м}^3$.

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 1900}{3.14 \times 75 \times 6.378 \times 3600}} = 0.0375 \text{ м}$$

По подсчитанному значению диаметра выбирается ближайший стандартный диаметр из табл. 2.2.

Рассчитанному значению подойдет внутренний диаметр, величина которого 51 мм.

2. Выбираем расчетную величину расхода, которая соответствует максимальному расходу:

$$G = 1900 \text{ кг/ч (из исходных данных).}$$

Таблица 2.2

Значение стандартных диаметров трубопроводов

Рабочая температура, °С	Рабочее давление, ат	Внутренний диаметр, мм
До 200	До 10	53,0; 68,0; 80,5; 106,0
	До 16	51,0; 66,5; 104
До 300	До 25	51,0; 70,0; 83,0; 102,0; 126,0
До 450	До 64	69,0; 82,0; 100,0; 125,0; 150,0; 164,0; 205,0; 259,0; 307,0; 359,0; 406,0; 462,0
	До 100	50,0; 68,0; 80,0; 98,0; 123,0; 147,0; 162,0; 203,0; 255,0; 305,0; 357,0; 404,0; 456,0

3. Определяем значение критерия Рейнольдса для принятого расчетного расхода из выражения:

$$Re = \frac{GD}{f\mu} = \frac{4G}{\pi D\mu} \quad (6)$$

где f - площадь сечения трубопровода, м; μ - динамический коэффициент вязкости, Па·с.

Для горючего газа и воздуха динамический коэффициент вязкости приведен в табл. 2.3, для воды и водяного пара - в табл. 2.4.

Таблица 2.3

Физические параметры горючих газов и воздуха

№	Наименование среды	Динамический коэффициент вязкости, 10^6 , Па с при температуре, °С			Плотность при нормальных условиях, ρ кг/м ³
		0	100	200	
1	Газ доменных печей	16,45	20,6	24,6	1,296
2	Газ коксовых печей	12,5	15,6	18,6	0,483
3	Газ природный бугурусланский	10,75	13,6	16,5	0,884
4	Газ природный елшанский	10,4	13,1	15,9	0,765
5	Газ природный дашавский	10,43	13,2	15,9	0,730
6	Воздух	17,16	21,77	25,89	1,293

Таблица 2.4

Динамический коэффициент вязкости воды и водяного пара ($\mu, 10^5$ Па)

t, °С	P, ат						
	1	20	40	60	80	100	150
0	178	178	178	177	177	177	176
10	130,5	130,5	130,5	130,5	130,5	131,5	131,5
20	100	100	100	100	100	100	100
30	80,1	80,1	80,2	80,2	80,2	80,2	80,3
40	65,3	65,3	65,3	65,4	65,5	65,5	65,6
50	54,9	54,9	55,0	55,0	55,1	55,1	55,2
60	46,9	46,9	47,0	47,0	47,1	47,1	47,2
70	40,5	40,5	40,5	40,6	40,7	40,7	40,8
80	35,4	35,4	35,5	35,5	35,6	35,6	35,7
90	31,5	31,5	31,6	31,6	31,6	31,6	31,7
100	1,195	28,2	28,3	28,3	28,4	28,4	28,5
120	1,275	23,7	23,8	23,8	23,9	23,9	24,0
140	1,3	20,1	20,2	20,2	20,3	20,3	20,4
160	1,43	17,4	17,5	17,5	17,6	17,6	17,7
180	1,51	15,3	15,4	15,4	15,5	15,5	15,6
200	1,59	13,6	13,7	13,7	13,8	13,8	13,9
220	1,67	1,69	12,6	12,6	12,7	12,7	12,3
240	1,76	1,77	11,5	11,6	11,6	11,7	11,8
260	1,83	1,84	1,87	10,7	10,7	10,9	10,9
280	1,92	1,93	1,95	1,98	9,9	10,0	10,1
300	2,0	2,01	2,03	2,06	2,10	9,1	9,2
320	2,09	2,09	2,11	2,14	2,17	2,22	8,64

340	2,17	2,18	2,20	2,22	2,2	2,29	7,78
360	2,2	2,27	2,28	2,30	2,32	2,36	2,51
380	2,34	2,04	2,37	2,38	2,40	2,44	2,56
400	2,42	2,43	2,45	2,46	2,49	2,52	2,62
420	2,51	2,52	2,5	2,55	2,58	2,60	2,68
440	2,60	2,61	2,62	2,64	2,66	2,68	2,76
460	2,69	2,70	2,71	2,72	2,74	2,76	2,84
480	2,78	2,78	2,79	2,80	2,82	2,84	2,91
500	2,88	2,88	2,89	2,90	2,92	2,94	2,99
520	2,95	2,96	2,97	2,98	3,00	3,01	3,07
540	3,04	3,05	3,06	3,07	3,09	3,10	3,16
560	3,14	3,14	3,15	3,16	3,18	3,19	3,25
580	3,22	3,22	3,23	3,24	3,26	3,28	3,33
600	3,33	3,34	3,35	3,6	3,37	3,38	3,42

Примечание: над чертой - вода, под чертой - пар.

При определении численных значений динамического коэффициента вязкости следует применять линейное интерполирование. В первом приближении можно считать, что динамический коэффициент вязкости не зависит от давления, а определяется лишь одной температурой.

С помощью табличных данных (табл. 2.3, 2.4) и метода интерполяции определяем значение динамического коэффициента вязкости.

$$\mu = 1435 \cdot 10^{-8} + \frac{190 - 100}{200 - 100} (1615 - 1435) \cdot 10^{-8} = 1579 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Отсюда получаем значение критерия Рейнольдса:

$$Re = \frac{4 \cdot 1900}{3.14 \cdot 0.051 \cdot 1579 \cdot 10^{-8} \cdot 3600} = 834890$$

4. Выбираем максимальный расчетный перепад давления:

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad (7)$$

$$\Delta p = 1.1 - 1 = 0.1 \text{ МПа}$$

Если задана допустимая величина потери давления p_0 , то ориентировочно можно принять $\Delta p = 2p_0$.

5. Определяем диаметр трубопровода при рабочей температуре t по уравнению:

$$D = D_{20} [1 + \alpha_0 (t - 20)] = D_{20} K_t \quad (8)$$

где α_0 - средний коэффициент линейного теплового расширения материала трубопровода; K_t - поправочный множитель на тепловое расширение (значения K_t приведены в таблице 2.5).

С помощью метода интерполяции определяем коэффициент K_t при температуре 190 °С для чугуна.

$$K_t = 1.0007 + \frac{190 - 100}{200 - 100} (1.0017 - 1.0007) = 1.0016$$

С учетом коэффициента K_t рассчитываем диаметр D :

$$D = 51 \cdot 1.0016 = 51.0816 \text{ мм}$$

6. Диаметр расточки диафрагмы d определяем в следующей последовательности:

а) подсчитываем значение $m\alpha$ из соотношения:

Таблица 2.5

Поправочный множитель K_t на тепловое расширение трубопровода и диафрагм

Материалы	Температура, °С					
	100	200	300	400	500	600
Сталь марок 20, 20Н, 15М, 15ХМ, 12МХ	1,0009	1,0021	1,0036	1,0050	1,0066	1,0082
Сталь марок Х23Н13, Х18Н25С2	1,0010	1,0025	1,0045	1,0066	1,0081	1,0093
Сталь марки 1Х18Н9Т	1,0012	1,0029	1,0048	1,0066	1,0082	1,0099
Бронза	1,0014	1,0031	1,0050	1,0069	1,0091	-
Чугун	1,0007	1,0017	1,0030	1,0044	1,0060	-

$$m\alpha = \frac{G}{1.11\xi D^2 \sqrt{\Delta p \rho}} \quad (9)$$

Величину ε берут из таблицы 2.6 по подсчитанному значению $\Delta p/p_1$ принимая $m=0,3$ (в первом приближении).

Сначала находим соотношение $\Delta p/p_1$:

$$\frac{\Delta p}{p_1} = \frac{0.1}{1.1} = 0.091$$

Затем методом интерполяции определяем значение ε :

$$\varepsilon = 0.93 + \frac{0.091 - 0.08}{0.16 - 0.08} (0.973 - 0.944) = 0.969$$

Таблица 2.6

Значение поправочного множителя на расширение среды, ε

	X=1,3				X=1,4			
	m=0	m=0,3	m=0,5	m=0,7	m=0	m=0,3	m=0,5	m=0,7
0	1	1	1	1	1	1	1	1
0,02	0,994	0,993	0,992	0,991	0,994	0,993	0,992	0,991
0,04	0,988	0,987	0,985	0,983	0,988	0,987	0,985	0,983
0,08	0,975	0,973	0,969	0,964	0,976	0,974	0,970	0,965
0,16	0,948	0,944	0,936	0,926	0,950	0,946	0,938	0,929
0,32	0,895	0,887	0,831	0,850	0,900	0,892	0,876	0,855

Исходя из выше приведенной формулы, вычисляем величину $та$:

$$та = \frac{1900}{1,11 \cdot 0,969 \cdot 0,0510816^2 \sqrt{0,1 \cdot 6,378 \cdot 3600 \cdot 10^3}} = 0,2355 ;$$

б) для найденного значения $та$ находят величину m .Для нахождения значения m по известной величине $та$ строим графическую зависимость $та = f(m)$ при принятом значении D .

Для этого по данным таблицы 2.7 берем четыре соответствующих значения m и $та$, которые представлены в табл. 2.8, и строим график $та = f(m)$. Для определения значений m проводим интерполяцию, так как диаметр трубопровода отличается от указанного в таблице (выбираем четыре точки так, чтобы две имели значение $та$ больше и две меньше, чем получилось при расчете по формуле).

Таблица 2. 7

Зависимость произведения $та$ от m и D

m	$D, \text{ мм}$			
	>300	200	100	50
0,05	0,03005	0,03020	0,03047	0,03065
0,075	0,04508	0,04541	0,04581	0,04610
0,1	0,06038	0,06070	0,06123	0,06265
0,125	0,07578	0,07618	0,07668	0,07740
0,15	0,0913	0,0918	0,0926	0,0933
0,2	0,1231	0,1237	0,1248	0,1258
0,25	0,1560	0,1567	0,1582	0,1597
0,3	0,1902	0,1910	0,1929	0,1948
0,35	0,2257	0,2268	0,2289	0,2314
0,4	0,2640	0,2652	0,2678	0,2707
0,45	0,3042	0,3056	0,3088	0,3021
0,5	0,3475	0,3492	0,3530	0,3569
0,55	0,3938	0,3960	0,4003	0,4048
0,6	0,4440	0,4467	0,4517	0,4569

0,65	0,4992	0,5024	0,5082	0,5112
0,7	0,5614	0,5653	0,5720	0,5788

По построенному графику определяют численное значение m . Величину m рекомендуется определять с числом значащих цифр, соответствующих погрешности порядка 0,1%.

При $m\alpha = 0,2355$ значение $m = 0,355$.

в) определяем предварительное значение диаметра расточки диафрагмы при температуре 20°C из соотношения:

$$d_{20} = D_{20} \sqrt{m},$$

$$d_{20} = 51 \sqrt{0,355} = 30,39 \text{ мм}$$

Таблица 2. 8

Зависимость произведения $m\alpha$ от m

m	0,25	0,3	0,35	0,4
$m\alpha$	0,1596	0,1947	0,23125	0,27053

7. Определяем потерю напора в диафрагме при расчетном расходе из соотношения:

$$p = K \Delta p, \text{ МПа} \quad (11)$$

где K - коэффициент, являющийся функцией от m (см. табл. 2.9).

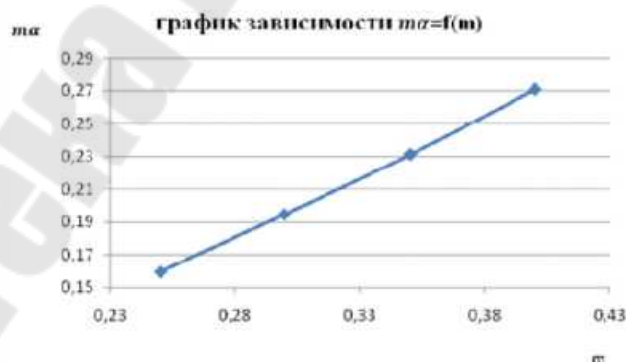


Рис. 2.6. График зависимости $m\alpha=f(m)$

Таблица 2. 9

Значения коэффициента K в зависимости от величины m

m	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
K	1	0,88	0,78	0,68	0,57	0,47	0,37	0,27

Применив метод интерполяции, получаем:

$$K = 0,57 + \frac{0,355 - 0,3}{0,4 - 0,3} (0,68 - 0,57) = 0,6305$$

Таким образом, потеря напора в диафрагме составит:

$$p = 0,6305 \cdot 100000 = 63050 \text{ Па}$$

8. Проверка определения диаметра расточки отверстия диафрагмы d заключается в следующем:

а) Из представленного ниже соотношения определяется коэффициент расхода:

$$\alpha = \alpha_{и} K_1 K_2 K_3,$$

где $\alpha_{и}$ - исходный коэффициент расхода; K_1 - поправочный множитель, который вводится при значении Re меньше предельного; K_2 - поправочный множитель на относительную шероховатость труб; K_3 - поправочный множитель на неостроту входной кромки.

б). Подсчитываем значение α . Для этого по расчетному значению m , пользуясь таблицей 3.10, определяем величину исходного коэффициента расхода $\alpha_{и}$ с точностью не менее третьего знака (применяя интерполирование в промежутке).

Таблица 2.10

Значение исходного коэффициента расхода $\alpha_{и}$ и предельные значения критериев Рейнольдса ($Re_{пред}$)

m	$\alpha_{и}$	$(Re_{пред})$
0,05	0,598	23000
0,1	0,602	30000
0,15	0,608	45000
0,2	0,615	57000
0,25	0,624	75000
0,3	0,634	93000
0,35	0,645	110000
0,4	0,66	130000
0,45	0,676	160000
0,5	0,695	185000
0,55	0,716	210000
0,6	0,74	240000
0,65	0,768	270000

$$\alpha_{\text{из}} = 0,634 + \frac{0,355 - 0,35}{0,4 - 0,3} (0,66 - 0,645) = 0,6465 ;$$

в) Определяем предельное значение критерия Рейнольдса:

$$Re_{\text{пред}} = 93000 + \frac{0,355 - 0,35}{0,4 - 0,3} (130000 - 110000) = 112000.$$

Так как предельное значение Re меньше рассчитанного ($Re_{\text{пред}} < Re_{\text{расч}}$), то $K_1=1$.

г) По таблице 2.11 определяем произведение K_2K_3 , зависящее от уже известных величин m и D .

При диаметре, равном 51 мм и $m=0,355$ получаем:

$$K_2K_3 = 1,0251,$$

$$\alpha = 0,6465 \times 1 \times 1,0251 = 0,6627.$$

Таблица 2.11

Произведение поправочных множителей K_2K_3 , для нормальных диафрагм

m	D , мм			
	300	200	100	50
-	300	200	100	50
0,05	1,005	1,010	1,019	1,025
0,15	1,001	1,0065	1,015	1,023
0,25	1	1,0045	1,014	1,024
0,35	1	1,0045	1,014	1,025
0,45	1	1,0045	1,015	1,026
0,55	1	1,0055	1,0165	1,028
0,65	1	1,0065	1,018	1,03

д) Точное значение ζ определяем по известным значениям m и $\Delta P/P_1$, воспользуясь по данными таблицы 2.6 (при приближенной оценке m принимался 0,3).

Методом интерполяции получаем $\zeta=0,969$.

ж) Исходя из полученных данных, вычисляем массовый расход по формуле:

$$G^* = 1,11 \alpha m \xi D^2 \sqrt{\Delta P_p}; \quad (13)$$

$$G^* = 1,11 \cdot 0,6627 \cdot 0,355 \cdot 0,969 \cdot 0,0510816^2 \sqrt{0,1 \cdot 106 \cdot 6,378} = 0,5277 \text{ кг/с.}$$

6. В таком случае погрешность составит:

$$\Delta = \frac{G - G^*}{G} \cdot 100\% ; \quad (14)$$

$$\Delta = \frac{1900 - 1899,72}{1900} \cdot 100\% = 0,015\%$$

Если полученное значение расхода отличается от расчетной величины расхода в пределах $\pm 0,5\%$, то расчет выполнен правильно. Если расхождение не превышает $\pm 2\%$, допускается уточнить диаметр отверстия диафрагмы по уравнениям:

$$d = d^* \sqrt{\frac{G}{G^*}} . \quad (15)$$

При расхождении больше 2% расчет выполняется вновь.

10. Наименьший расход, при котором не нужно вводить поправочный множитель K_1 , получим из выражения:

$$G_{min} = G_{расч} \frac{Re_{пред}}{Re_{расч}} ; \quad (16)$$

$$G_{min} = 1899,72 \frac{112000}{834890} = 254,85 \frac{кг}{ч} .$$

Вывод: Выполненный расчет расходной диафрагмы трубопровода показал, что погрешность расчета не превышает 0,5%, и равна $\Delta = 0,015\%$, поэтому можно сделать заключение о том, что расчет выполнен корректно.

Расчет термопреобразователя (термопары)

Термопреобразователь (термопара) установлен в газоход, футерованном огнеупорным кирпичом. Температура, показываемая термометром $t_T = 1210 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура стенки $t_{СТ} = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи от газового потока к термопреобразователю $\alpha_k = 400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})$ Коэффициент теплоты чехла термопреобразователя $E_T = 0,70$.

Считая газ лучепрозрачным определить погрешность измерения, вызванную лучистым теплообменом. Как изменится эта погрешность, если температура стенки повысится на 5 %, за счет улучшения изоляции газохода?

Считая температуру стенки первоначально заданной, определить, как изменится погрешность измерения температуры газа, если произвести

экранирование термопреобразователя.

Приведенный коэффициент теплоты системы термопреобразователь - экран $E_{тэ} = 0,80$; коэффициент черноты экрана $E_э = 0,81$; коэффициент теплоотдачи от газового потока к экрану

$$\alpha_{кз} = 390 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Решение

1. Количество теплоты, отдаваемое поверхностью термопреобразователя путем лучистого теплообмена с поверхностью трубы, находим из формулы:

$$Q_{л} = E_{пр} * \sigma_0 F \left[\left(\frac{T_T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 \right], \quad (17)$$

где $E_{пр}$ - приведенный коэффициент черноты двух тел;

σ_0 - постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$

T_T - температура термопреобразователя;

$T_{ст}$ - температура топки.

Так как термопреобразователь находится внутри газохода и его поверхность F мала по сравнению с поверхностью газохода, участвующей в лучистом теплообмене, то можно принять приведенный коэффициент черноты системы $E_{пр}$, равным коэффициенту черноты E_T поверхности термопреобразователя.

Тогда будем иметь:

$$Q_{л} = C * F \left[\left(\frac{T_T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 \right], \quad (18)$$

где C - коэффициент излучения поверхности теплоприемника.

$$C = \sigma_0 \cdot E_m = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,7 = 3,969 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}.$$

2. Количество тепла, получаемое поверхностью термопреобразователя от газа, протекающего в газоходе, определяется по формуле:

$$Q_{г} = \alpha \cdot F (t_{г} - t_T) \quad (19)$$

Учитывая, что все тепло, получаемое термопреобразователем конвекцией от омывающего его газа отдается лучеиспускателем, т.е. $Q_K = Q_n$, получим формулу для определения погрешности измерения, вызванную лучистым теплообменом:

(20)

$$\Delta t = -\frac{3,969 \cdot 10^{-8}}{400} \left[\left(\frac{1483}{100} \right)^4 - \left(\frac{1373}{100} \right)^4 \right] = -127,3 \cdot 10^{-8} \text{ К}$$

3. Если температура стенки повысится на 5 % и составит $t_c = 1155$ С, тогда:

$$\Delta t = -\frac{3,969 \cdot 10^{-8}}{400} \left[\left(\frac{1483}{100} \right)^4 - \left(\frac{1428}{100} \right)^4 \right] = -67,3 \cdot 10^{-8} \text{ К}$$

Таким образом, при повышении температуры стенки на 5 %, погрешность измерения уменьшится.

Литература

1. Теплотехника. Под ред. И.Н. Сушкина. – М.: Metallurgy, 1973.
2. Теплотехника. Под ред. А.П. Баскакова. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника. Справочник. Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. Книга 4. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
4. Кривандин В.А. Теплотехника металлургического производства. Т.1. Теоретические основы: учебное пособие для вузов / В.А. Кривандин, В.А. Арутюнов, В.В. Белоусов и др. – М.: МИСИС, 2002. – 608 с.
5. Панферов Н.Н. Теплотехнические измерения. Учеб.-метод. комплекс. СПб.: Изд-во СЗТУ, 2011, 171 с.
6. Волошенко А.В. Технические измерения и приборы (курс лекций). 2009, 132 с.
7. Братковский Е.В. Технологические измерения и приборы: Учебн. пособие / Е.В. Братковский, А.В. Заводяный. Новотроицк: ГТУ МИСиС, 2007, 128 с.
8. Иванова Г.М. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для ВУЗов/ Г.М. Иванова, Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МЭИ, 2008, 458 с.
9. ГОСТ 8.417-2002 ГСИ «Единицы величин».
10. ГОСТ 8.586.1-2005 Измерение расхода количества жидкостей и газа с помощью сужающих устройств.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Варианты заданий по расчету расходной диафрагмы

№ варианта	Теоретическая часть	Данные для расчета						
	Тип преобразователя материал	Измеряемая среда	P ₁ , МПа	P ₂ , МПа	P _{дз} , МПа	Температура среда	Максимальный расход	Минимальный расход
1	ПТ-ТП 68 Сталь марки 20	Вода	0,7	0,89	-	80	35000	23000
2	ПТ-ТС 68 Сталь марки 20Н	Вода	0,6	-	0,025	85	32000	25000
3	НП-ТЛ1-М Сталь марки 15М	Вода	0,55	0,5	-	70	28000	20000
4	НП-ТЛ1-М Бронза	Водяной пар	9	-	0,013	190	2800	1700
5	НП-3 Сталь марки 12МХ	Вода	0,6	0,5	-	90	31000	25000
6	ЭПП-63 Сталь марки X23Н13	Водяной пар	12	11	-	200	1000	700
7	ПТ-ТС 68 Сталь марки X18Н9Т	Водяной пар	11	10,5	-	180	2000	1800
8	ЭПП-63 Сталь марки 12МХ	Водяной пар	7	6	-	160	2300	1800
9	ПТ-ТП 68 Сталь марки 15 ХМ	Вода	0,65	0,62	-	75	30000	20000
10	НП-ТЛ1-М Чугун	Водяной пар	8	7	-	170	1700	1000
11	НП-3 Сталь марки 15 ХМ	Газ доменных печей	14	-	0,03	300	3000	2800
12	НП-СЛ1-М Сталь 12МХ	Газ коксовых печей	10	-	0,01	320	2500	2400
13	НП-ТЛ1-М Сталь марки 15М	Газ природный бугурусланский	11	10,9	-	280	2765	2700
14	НП-ТЛ1-М Бронза	Газ природный елшанский	10,5	10,2	-	295	2856	2800
15	НП-ТЛ1-М Сталь марки X23Н13	Газ природный дашавский	9	8,97	-	301	2098	2000
16	НП-3 Чугун	Воздух	9,8	9,86	-	110	2157	2100
17	НП-ТЛ1-М Бронза	Вода	0,5	-	0,012	76	25790	25000
18	НП-ТЛ1-М Чугун	Вода	0,55	-	0,011	89	31468	30000

19	НП-3 Сталь марки X23H13	Газ доменных печей	14	13,98	-	270	3000	2800
20	ПТ-ТС 68 Сталь марки 20Н	Водяной пар	7	7,03		115	1745	1700
21	НП-ТЛ1-М Сталь марки 15М	Вода	0,65	-	0,03	94	29760	29000
22	НП-ТЛ1-М Бронза	Водяной пар	9	9,002	-	169	1506	1500
23	НП-3 Чугун	Водяной пар	10	-	0,3	150	1000	900
24	ЭПП-63 Сталь марки 20	Вода	0,65	0,64	-	89	10000	9000
25	НП-3 Чугун	Водяной пар	9,5	-	0,02	170	2754	2700
26	ЭПП-63 Сталь марки 15ХМ	Водяной пар	10,5	-	0,025	190	3200	3100
27	НП-СЛ1-М Сталь марки 20	Газ коксовых печей	8	7,8	-	350	2467	2300
28	НП-ТЛ1-М Сталь марки 20Н	Газ природный бугурусланский	9,5	-	0,034	345	2146	2000
29	ПТ-ТС 68 Сталь марки 15М	Газ природный елшанский	8,7	-	0,04	400	2864	2800
30	ПТ-ТП 68 Сталь марки 15М	Газ природный дашавский	8,3	-	0,05	368	2436	2300

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Варианты заданий по расчету термопреобразователя (термопары)

Параметр	Исходные данные по вариантам				
	1	2	3	4	5
Показания термометра, t_r , °C	1100	1150	1240	1270	1300
Температура стенки, °C	1035	1090	1200	1210	1220
Коэффициент теплоотдачи от газового потока к термопреобразователю, $Вт/(м^2 \cdot К)$	375	380	415	460	480
Коэффициент теплоотдачи от газового потока к экрану, $\lambda_{п}$ $Вт/(м^2 \cdot К)$	355	360	395	440	460
Коэффициент черноты термопреобразователя $-E_T$	0,50	0,48	0,52	0,54	0,56
Коэффициент черноты экрана $-E_э$	0,78	0,88	0,90	0,85	0,81
Приведенный коэффициент черноты системы термопреобразователя $-E_{пэ}$	0,65	0,77	0,81	0,76	0,78
Показания термометра, t_r °C	1120	1140	1210	1260	1310
Температура стенки, $t_{ст}$ °C	1040	1070	1200	1210	1220
Коэффициент теплоотдачи от газового потока к термопреобразователю $\lambda_{пр}$, $Вт/(м^2 \cdot К)$	375	380	415	460	480
Коэффициент теплоотдачи от газового потока к экрану, $\lambda_{пр}$, $Вт/(м^2 \cdot К)$	355	360	395	440	460
Коэффициент черноты термопреобразователя $-E_T$	0,50	0,48	0,52	0,54	0,56
Коэффициент черноты экрана $-E_э$	0,78	0,88	0,90	0,85	0,81
Приведенный коэффициент черноты системы термопреобразователя $-E_{пэ}$	0,65	0,77	0,81	0,76	0,78

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И ИЗМЕРЕНИЯ

**Практикум
для слушателей специальности переподготовки
1-42 01 71 «Металлургическое производство
и материалобработка»
заочной формы обучения**

Составитель Герасимова Ольга Валентиновна

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 05.04.21.

Рег. № 21Е.

<http://www.gstu.by>