

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию
Южно-Уральский государственный университет
Кафедра «Гидравлика и гидропневмосистемы»

532.5 (07)
3-475

В.Г. Зезин, В.А. Лазуков

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА СПЛОШНЫХ СРЕД МЕТОДОМ ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

Учебное пособие

Челябинск
Издательство ЮУрГУ
2007

УДК 532.55 (075.8) + 533.6.08 (075.8) + 532.57 (075.8)
З-475

Одобрено
учебно-методической комиссией аэрокосмического факультета

Рецензенты:
Попов П.В, Попов Г.П.

Зезин, В.Г.

З-475 Определение расхода сплошных сред методом переменного перепада давления: учебное пособие / В.Г. Зезин, В.А. Лазуков. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 102 с.

В учебном пособии изложены теоретические и практические основы по определению расхода сплошной среды с применением сужающих устройств. Излагается подробная методика определения расхода с применением стандартных диафрагм, сопел ИСА и труб Вентури на основании материалов ГОСТ 8.563.1, ГОСТ 8.563.2, а также методика расчета погрешности определения расхода. Приведены основные рекомендации по построению систем измерения расхода с использованием стандартных сужающих устройств. Приведена методика выбора отверстия стандартной диафрагмы при измерении заданной величины расхода. Даются примеры расчета, иллюстрирующие применение данного метода определения расхода. Для выполнения расчетов в настоящем пособии имеются необходимые справочные данные по свойствам материалов, газов и жидкостей. Для удобства проведения расчетов изложенные в пособии методики реализованы в виде программ расчета, файлы с которыми содержатся на прилагаемом CD-диске. Приведены требования к содержанию отчета по практическим занятиям и контрольные вопросы для самостоятельной подготовки студента.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальностям, связанным с изучением гидрогазодинамических процессов. Пособие может быть использовано аспирантами и исследователями при проведении научных экспериментов.

УДК 532.55 (075.8) + 533.6.08 (075.8) + 532.57 (075.8)

© Издательство ЮУрГУ, 2007

ВВЕДЕНИЕ

Пособие предназначено для углубленного изучения теоретического материала, связанного с измерением расходов сплошных сред, а также для практических занятий студентов. Тема практических занятий предусматривает определение расхода газов и жидкостей по замеренному перепаду давления на стандартной диафрагме и замеренным физическим параметрам контролируемой среды, а также определения погрешности этой измерительной системы.

Целью практических занятий по теме является закрепление знаний, полученных при лекционных занятиях и самостоятельной работе студентов, приобретение практических навыков применения изложенных в настоящем учебном пособии методов расчета и методов построения измерительной системы для определения расхода газов или жидкостей.

В процессе выполнения практической работы проведения студенты должны выполнить контрольное задание. Задачами практических занятий являются:

- освоение принципов построения систем измерения расхода с применением сужающих устройств;
- освоение методики выбора размеров стандартной измерительной диафрагмы по заданной величине расхода;
- освоение нормативной методики определения расхода среды по замеренному перепаду на сужающем устройстве и замеренным физическим параметрам контролируемой среды;
- освоение методики оценки погрешности определения расхода при использовании сужающих устройств.

При выполнении контрольных заданий студенты должны использовать настоящее учебное пособие, конспект лекций и рекомендованную литературу.

По завершении практических занятий по данной теме работы каждый студент оформляет отчет в соответствии с требованиями раздела 7 и действующих в университете нормативных документов.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА МЕТОДОМ ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

Одним из наиболее распространенных и изученных способов измерения расхода жидкостей, газов и пара является метод измерения расхода по перепаду давления в сужающем устройстве (СУ). Последнее устанавливается в измерительном трубопроводе (ИТ) и создает в нем местное сужение, вследствие чего при протекании вещества повышается скорость в суженном сечении по сравнению со скоростью потока до сужения. Увеличение скорости, а следовательно, и кинетической энергии в суженном сечении вызывают уменьшение потенциальной энергии потока в этом сечении. Соответственно статическое давление в суженном сечении будет меньше, чем в сечении до СУ. Таким образом, при протекании вещества че-

рез сужающее устройство создается перепад давления, зависящий от скорости потока и, следовательно, расхода жидкости. То есть перепад давления Δp в сужающем устройстве, измеренный, например, с помощью дифференциального манометра, может служить мерой расхода вещества. Численная же величина расхода может быть определена по перепаду давления расчетным путем.

Измерение расхода с помощью метода переменного перепада давлений является наиболее универсальным. Этот метод применим для измерения расхода жидких, газовых и паровых сред, протекающих по трубопроводам диаметром 50 мм и более. В качестве сужающих устройств применяют стандартные диафрагмы, стандартные сопла, сопла и трубы Вентури, а также нестандартные сужающие устройства. Методика определения расхода с помощью стандартных сужающих устройств регламентирована государственным стандартом [1, 2]; нестандартные сужающие устройства перед применением в качестве средств измерения расхода требуют предварительной тарировки.

Рассмотрим физическую картину течения сплошной среды через сужающее устройство на примере диафрагмы. Диафрагма представляет собой тонкий диск с отверстием круглого сечения, центр которого лежит на оси трубы. Характер течения и распределение давлений вблизи диафрагмы показаны на рис. 1.1.

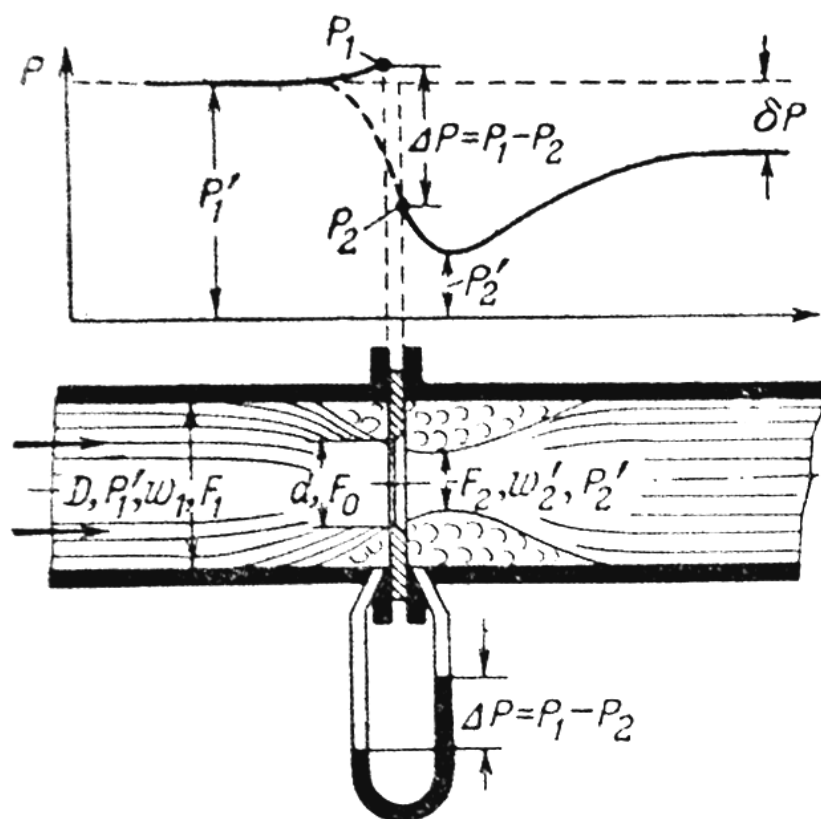


Рис. 1.1. Характер течения и распределение давлений в диафрагме

Сужение потока начинается до диафрагмы и на некотором расстоянии за диафрагмой поток достигает минимального сечения. Далее поток постепенно расширяется до полного сечения трубопровода. На рис. 1.1 сплошной линией представлена кривая, характеризующая распределение давления вдоль стенки трубопровода.

да; пунктирной линией – распределение давлений по оси трубопровода. Как видно из рис. 1.1, давление за диафрагмой полностью не восстанавливается.

Значительная потеря давления при протекании вещества через диафрагму обусловливается, главным образом, внезапным расширением живого сечения струи после выхода потока из диафрагмы и наличием мертвых зон, заполненных вихреобразованиями, на что затрачивается значительная часть энергии. Изменение направления струек перед диафрагмой и сжатие струи после диафрагмы имеют незначительное влияние.

1.1. Измерительные системы с использованием стандартных сужающих устройств

Измерение расхода методом переменного перепада давлений проводят с помощью измерительных комплексов (ИК), состоящих в общем случае из следующих основных узлов:

- стандартных сужающих устройств;
- измерительных трубопроводов с прямыми участками, расположенными между СУ и местными сопротивлениями;
- средств измерений перепада давления на СУ и параметров состояния среды;
- средств обработки результатов измерений (планиметров, счетных устройств ручного или автоматического действия и т. д.);
- соединительных линий и вспомогательных устройств.

По степени автоматизации процесса измерений и обработки результатов измерений ИК подразделяют на системы:

- отдельных измерений переменных контролируемых параметров и обработки результатов измерений;
- полуавтоматических измерений переменных контролируемых параметров с вычислительными устройствами обработки результатов измерений и устройствами с ручным вводом значений условно-постоянных* параметров или ручной коррекцией результатов измерений и вычислений;
- автоматических измерений всех контролируемых параметров с вычислительными устройствами обработки результатов измерений в реальном масштабе времени.

При компоновке измерительных систем с использованием стандартных сужающих устройств должны выполняться следующие основные требования.

Основными компонентами измерительной системы являются сужающее устройство с отверстиями для отбора давления и прибор для измерения перепада давления (дифференциальный манометр), соединенные импульсными трубками.

* Условно-постоянным называют параметр, который может считаться постоянным в течение времени проведения измерений. Например, при измерении расхода водопроводной воды при невысоком давлении и температуре условно-постоянной может считаться ее плотность.

Дифманометр должен находиться как можно ближе к СУ для уменьшения времени его реакции на изменение перепада давления. Рекомендуется, чтобы длина соединительных трубок не превышала 16 м. При необходимости применения больших длин целесообразно использовать электрическую или пневматическую передачу.

Использование соединительных трубок длиной более 16 м допускается, если установлено, что это не влияет на показания дифманометра (манометра).

Во избежание искажения перепада давления, возникающего из-за разности температур, две соединительные трубки должны находиться рядом. В случае опасности нагрева или охлаждения соединительных трубок их совместно теплоизолируют.

Внутреннее сечение соединительных трубок должно быть одинаковым по всей длине, а диаметр должен быть более 6 мм даже для чистых веществ и коррозионно-стойких трубок, чтобы избежать опасности их засорения при длительной эксплуатации.

В случае опасности конденсации или образования пузырьков газа внутренний диаметр соединительных трубок должен быть не менее 10 мм.

Соединительные трубки устанавливают с наклоном к горизонтали более чем 1:12. Такой наклон обеспечивает движение конденсата и твердых частиц вниз до обогревающих отстойников или цилиндров, а пузырьков газа – до газосборных камер.

При измерениях расхода пара импульсные трубки, соединяющие СУ и дифманометр, заполняются конденсатом. При измерениях перепада давления происходит нарушение равенства высот конденсатных столбов в обеих соединительных трубках вследствие перемещения части конденсата в дифманометр, что приводит к возникновению дополнительной погрешности измерений перепада давления.

Для уменьшения этой дополнительной погрешности применяют уравнильные (конденсационные) сосуды. Сосуды располагают на одном уровне. В горизонтальных трубопроводах сосуды размещают непосредственно у СУ на одном уровне с ним. При невозможности выполнения данного условия сосуды размещают выше СУ.

В вертикальных трубопроводах сосуды располагают на одном уровне с верхним отверстием для отбора давления или выше его уровня.

Дифманометр при измерении расхода пара рекомендуется располагать ниже СУ (рис. 1.2, а).

При $p > 2 \text{ кгс/см}^2$ допускается устанавливать дифманометр выше СУ по схеме, представленной на рис. 1.2, б (данная схема применима также при расположении дифманометра ниже СУ на расстоянии 1,5 м). При установке дифманометра по рис. 1.2, б следует в наивысших точках соединительных трубок устанавливать газосборники.

Схема, приведенная на рис. 1.2, в, допустима при $p \leq 2 \text{ кгс/см}^2$ и расстоянии между сосудом и трубопроводом не более 4 м. При этом трубки, соединяющие СУ с сосудами, должны иметь внутренний диаметр 25 мм.

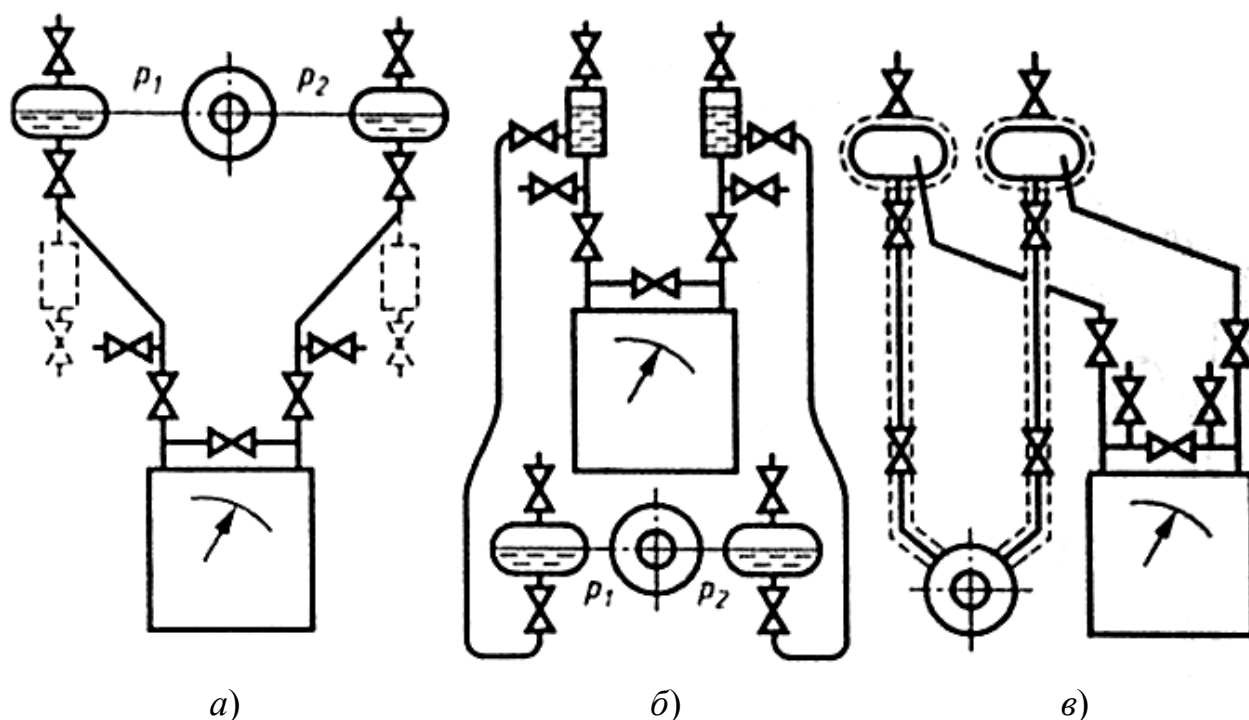


Рис.1.2. Схема расположения уравнительных сосудов и соединительных трубок. Дифманометр находится: а) ниже сужающего устройства; б) выше сужающего устройства (при $p > 2 \text{ кгс/см}^2$); в) выше сужающего устройства (при $p \leq 2 \text{ кгс/см}^2$)

При измерениях расхода жидкости, пара и газа, в которых имеется взвесь или влага (в газах), применяют отстойные камеры. Отстойные камеры размещают в нижней точке соединительных трубок (рис. 1.3).

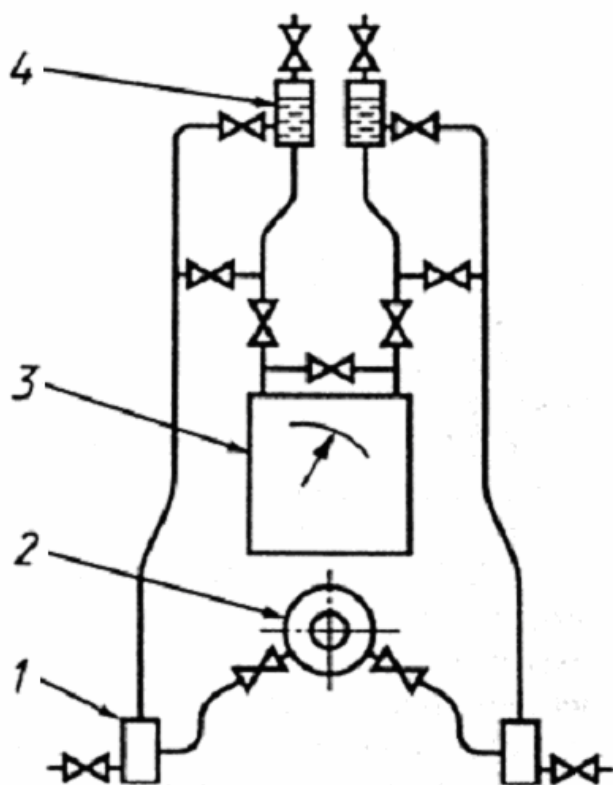


Рис.1.3. Схема соединений отстойной камеры для измерений расхода воды при установке дифманометра выше СУ: 1 – отстойная камера; 2 – сужающее устройство; 3 – дифманометр; 4 – воздухоотборник

Дифманометр, как правило, оснащают присоединительными (разъединительными), продувочными и уравнительными кранами.

Присоединительные краны предназначены для подключения (отключения) дифманометра к соединительным трубкам. Продувочные (вентиляционные) краны предназначены для продувки чувствительных камер дифманометра с целью удаления осадков. Уравнительный кран предназначен для проверки установки указателя дифманометра на нуль под статическим давлением. При подаче очистного потока для очистки соединительных трубок или при продувке самого дифманометра присоединительные краны закрывают, продувочные краны открывают.

Входные патрубки продувочных кранов могут быть использованы для подсоединения дифманометра к источнику образцового давления при проведении поверочных работ без отсоединения дифманометра от основных соединительных трубок.

Измерение абсолютного давления среды. Абсолютное или избыточное давление измеряют перед СУ манометром любого типа через отдельное отверстие, размещенное в сечении ИТ в месте установки отверстия для отбора перепада давления. Допускается присоединение манометра к плюсовой соединительной трубке дифманометра. В этом случае место соединения трубок располагают непосредственно у СУ. При таком подсоединении манометра его одновременная работа с дифманометром не влияет на показания расходомера. При другой компоновке соединительных линий необходима проверка взаимного влияния манометра и дифманометра. Барометрическое давление измеряют в месте расположения манометра избыточного давления.

Измерение температуры среды. Температуру контролируемой среды определяют путем ее измерений термометрами любой типа. Измерения температуры среды проводят на прямом участке в проточной части ИТ перед или за СУ. Предпочтение следует отдавать измерениям температуры за СУ. При установке чувствительного элемента (преобразователя) термометра или его гильзы за СУ расстояние от места их расположения до СУ должно быть не менее $5 D$ и не более $15 D$ (D – внутренний диаметр трубопровода). При установке чувствительного элемента термометра до СУ он должен размещаться на расстоянии не менее $5 D$ при диаметре гильзы преобразователя менее $0,03 D$ и на расстоянии не менее $20 D$ при диаметре гильзы преобразователя менее $0,13 D$. Рекомендуемые схемы установки чувствительного элемента преобразователя термометра приведены на рис. 1.4. Чувствительный элемент термометра устанавливают непосредственно в ИТ или в гильзу (карман). При установке чувствительного элемента преобразователя термометра в карман обеспечивают надежный тепловой контакт. Для обеспечения теплового контакта карман, например, заполняют жидким маслом.

Измерение плотности, состава и влажности среды. Для определения плотности, состава и влажности контролируемой среды могут применяться специальные средства измерений. Рекомендации по выбору соответствующих средств измерений и их установки на ИТ приведены в [2].

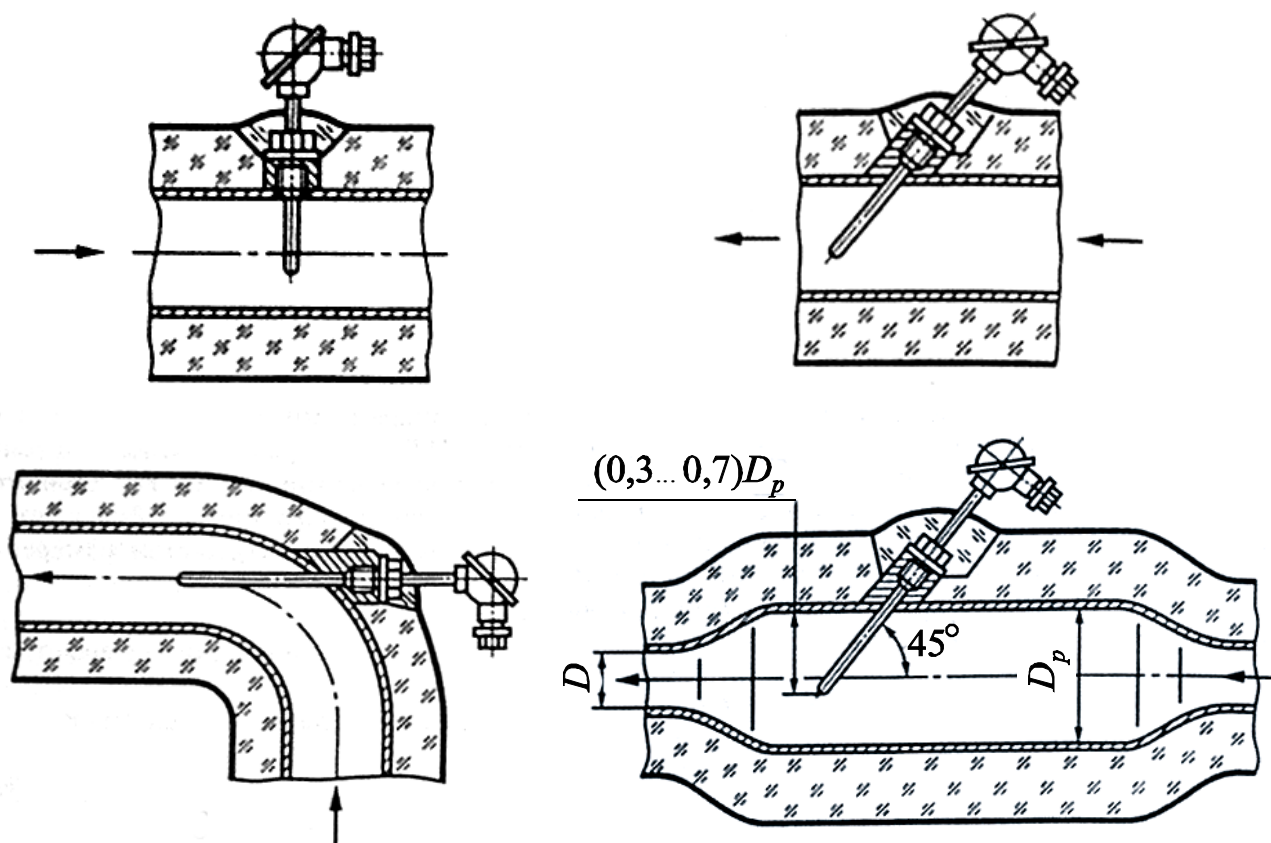


Рис. 1.4. Схема установки чувствительного элемента преобразователя термометра

Плотность газов при рабочих условиях может быть определена через их плотность при стандартных условиях, давление и температуру (для смесей газов дополнительно – через компонентный состав, например по ГОСТ 30319.1), а также только через давление и температуру.

Плотность жидкостей может быть определена через давление, температуру (для смесей жидкостей дополнительно – через компонентный состав, например по ГОСТ 28656).

Более подробные рекомендации по установке и конструкции элементов измерительной системы с применением СУ приведены в [2].

Измерительный трубопровод. Измерительный трубопровод перед сужающим устройством должен быть цилиндрическим на длине не менее $2D$; допускаемое отклонение не более $\pm 0,3\%$.

Длина прямолинейного участка ИТ между СУ и ближайшим местным сопротивлением должна быть не менее L_{k1} (кроме труб Вентури), рассчитываемой по формуле

$$L_{k1} = l/D = a_k + b_k \beta^{c_k}, \quad (1.1)$$

где a_k , b_k , c_k — постоянные коэффициенты, зависящие от типа МС, значения которых приведены в табл. 1.1; l , D — абсолютная длина и внутренний диаметр рассматриваемого участка ИТ; β — отношение диаметра отверстия СУ к внутреннему

диаметру измерительного трубопровода перед СУ при рабочей температуре среды.

Таблица 1.1

Наименьшие относительные длины L_{k1} прямых участков между СУ и местными сопротивлениями (кроме труб Вентури)

Местное сопротивление	Коэффициенты уравнения (1.1)		
	a_k	b_k	c_k
Для МС, расположенных перед СУ			
1. Задвижка, равнопроходный шаровой кран	11,5	82,0	6,7
2. Пробковый кран	14,5	30,5	2,0
3. Запорный клапан, вентиль	17,5	64,5	4,1
4. Затвор (заслонка)	21,0	38,5	1,4
5. Конфузор	5,0	114	6,8
6. Симметричное резкое сужение	30,0	0,0	0,0
7. Диффузор	16,0	185	7,2
8. Симметричное резкое расширение	47,5	54,5	1,8
9. Одинокое колено, тройник с заглушкой	10,0	113	5,2
10. Группа колен в одной плоскости, разветвляющиеся потоки	13,5	82,5	3,7
11. Группа колен в разных плоскостях, смешивающиеся потоки	33,5	115	4,0
12. Местное сопротивление неопределенного типа	54,5	65,0	1,6
13. Гильза термометра, плотномера или карман диаметром:			
$\leq 0,03 D$	5,0	0	0
$\leq 0,13 D$	20,0	0	0
14. Струевыпрямитель	22,0	0	0
Для МС, расположенных за СУ			
15. Любое местное сопротивление	0	8,55	0,55
Примечания:			
1. Термометры и плотномеры диаметром менее $0,13 D$ устанавливают за СУ на расстоянии $5 D$ – $15 D$. Любые термометры перед СУ устанавливают на расстоянии не далее первого МС.			
2. Значения длин прямых участков в пунктах 1–4 таблицы приведены для полностью открытой запорной арматуры			

Если длины прямых участков ИТ перед СУ меньше длины L_{k1} , то при расчетах расхода по изложенной ниже методике появляется дополнительная погрешность δ_L ; подробнее см. раздел 2.3.

Наименьшие длины прямых участков ИТ между трубой Вентури и МС должны соответствовать значениям, приведенным в табл. 1.2.

Для промежуточных значений относительного диаметра трубы Вентури, не указанных в табл. 1.2, наименьшие длины прямых участков ИТ выбирают путем линейной интерполяции табличных данных.

Таблица 1.2

Наименьшие относительные длины прямых участков ИТ между классической трубой Вентури и ближайшим перед ней МС

Местное сопротивление	Минимально допустимая длина при $\delta_L = 0,5 \%$. Наименьшая длина, при которой $\delta_L = 0 \%$									
	При β , равном									
	0,3	0,35	0,40	0,45	0,5	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
Задвижка, равнопроходный шаровой кран	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	3,5	3,5
	1,5	2,5	2,5	3,5	3,5	4,5	4,5	4,5	5,5	5,5
Конфузор	—	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	2,5	3,5
	0,5	1,5	2,5	4,5	5,5	6,5	8,5	9,5	10,5	11,5
Диффузор	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5	1,5	2,5	3,5	4,5
	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	3,5	3,5	4,5	5,5	6,5
Одиночное колено	—	—	—	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0
	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	2,5	3,0	4,0	4,0	4,5
Группа колен в одной плоскости	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	2,5	2,5	2,5	3,5
	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	3,5	4,5	4,5	4,5
Группа колен в разных плоскостях	0,5	0,5	0,5	0,5	8,5	12,5	17,5	23,5	27,5	29,5
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Примечание. Длину прямого участка следует измерять от плоскости, проходящей через ось отверстия перед классической трубой Вентури										

Наименьшая длина прямого участка ИТ между трубой Вентури и МС, не указанным в табл. 1.2, может быть определена по уравнению (1.1) и по табл. 1.1.

Для прямых участков за трубой Вентури установка деталей арматуры и других МС не отражается на точности измерений, если они расположены на расстоянии не менее $4D$ от плоскости отверстия для отбора давления за трубой Вентури.

При установке труб Вентури к измерительному трубопроводу предъявляются следующие дополнительные требования.

1. Входной ИТ должен быть цилиндрическим на длине не менее $2D$ измеренной от входного торца цилиндрической части трубы Вентури.

2. Среднее значение диаметра D ИТ, примыкающего к классической трубе Вентури, не должно отличаться более чем на 1% от значения диаметра входного цилиндрического участка трубы Вентури. Кроме того, результаты отдельных измерений диаметра ИТ на длине $2D$ от входа трубы Вентури не должны отличаться от среднего значения более чем на 2% .

3. Диаметр ИТ, расположенного непосредственно за трубой Вентури, должен быть не менее 90% диаметра на срезе его диффузора. Это означает, что могут быть использованы трубопроводы с таким же диаметром отверстия, как и у выходного сечения диффузора трубы Вентури.

4. Значение относительной шероховатости ИТ на длине не менее $2 D$ до трубы Вентури должно быть $R_{\text{ш}}/D \leq 10^{-3}$.

5. Смещение оси ИТ перед трубой Вентури относительно оси трубы Вентури, измеренное в плоскости стыка трубопровода с цилиндрическим участком трубы Вентури, должно быть не более $0,005 D$. Взаимный перекося осей трубы Вентури и ИТ должен быть не более 1 %. Суммарное значение указанного осевого смещения и половины отклонения значения диаметра ИТ от среднего значения должно быть не более $0,0075 D$.

В процессе измерений расхода запорная арматура должна быть полностью открытой. Запорную арматуру, используемую для регулирования расхода, рекомендуют располагать за СУ.

При установке СУ за МС с суммарной длиной прямых участков более $44 D$ рекомендуется применять струевыпрямители. Описание и конструкции струевыпрямителей рекомендуемых типов приведены в [1].

1.2. Стандартные диафрагмы

Стандартная диафрагма – это диск с круглым отверстием, имеющий острую прямоугольную входную кромку. Основным параметром диафрагмы, как и любого другого стандартного сужающего устройства, является относительный диаметр отверстия (диаметр горловины) СУ – отношение диаметра отверстия СУ к внутреннему диаметру измерительного трубопровода перед СУ при рабочей температуре среды:

$$\beta = d / D. \quad (1.2)$$

На рис. 1.5 показано поперечное сечение стандартной диафрагмы. К геометрическим характеристикам диафрагмы предъявляются определенные требования. Основные из них следующие. Торцы диафрагмы A и B должны быть плоскими и параллельными друг другу. Шероховатость Ra поверхности входного торца A должна быть не более или равна $10^{-4}d$, выходного торца B – $Ra \leq 0,01$ мм. Длина e цилиндрической части отверстия диафрагмы должна быть от $0,005 D$ до $0,02 D$. Толщина E_d диафрагмы должна находиться в пределах от e до $0,05 D$. При $50 \text{ мм} < D < 64 \text{ мм}$ допустима толщина E_d до 3,2 мм. Наименьшую необходимую толщину диафрагмы с учетом изложенных выше требований определяют из условия отсутствия ее деформации в рабочих условиях. Если толщина диафрагмы превышает длину e отверстия, то оно со стороны выходного торца должно иметь коническую поверхность. Угол наклона F образующей конуса должен быть $45^\circ \pm 15^\circ$. Входная кромка G и выходные кромки H и I не должны иметь притуплений и заусенцев, заметных невооруженным глазом. Входная кромка G должна быть острой, радиус ее закругления должен быть не более 0,05 мм. Это требование проверяют внешним осмотром невооруженным глазом по отсутствию отражения светового луча от входной кромки.

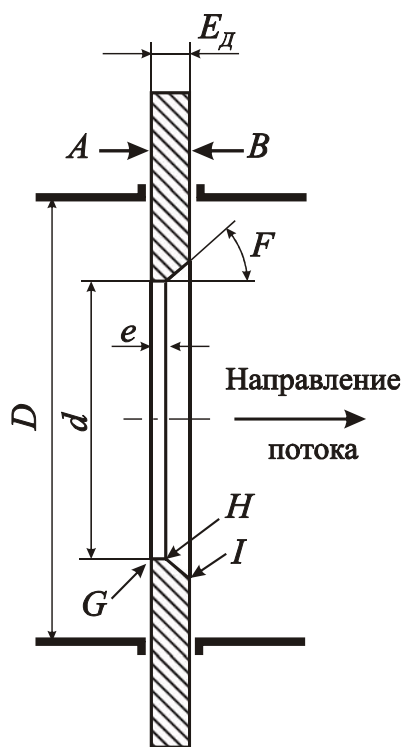


Рис. 1.5. Стандартная диафрагма

Стандартные диафрагмы применяют для трубопроводов с диаметром $50 \text{ мм} \leq D \leq 1000 \text{ мм}$. Диаметр диафрагмы должен быть $d > 12,5 \text{ мм}$, при этом $0,2 \leq \beta \leq 0,75$.

Для измерения расхода среды, протекающей по трубопроводу в прямом и обратном направлениях, применяют симметричные диафрагмы, у которых оба торца выполняют, как входной торец A.

Отбор давления на дифференциальный манометр при применении стандартных диафрагм может выполняться тремя способами: трехрадиусный отбор (рис. 1.6, а); фланцевый отбор (рис. 1.6, б); угловой отбор (рис. 1.7).

При трехрадиусном отборе номинальное расстояние l_1 до оси отверстия для отбора давления перед диафрагмой равно D и может находиться в пределах от $0,9 D$ до $1,1 D$. Номинальное расстояние l_2 до оси отверстия для отбора давления за диафрагмой равно $0,5 D$.

При фланцевом способе отбора давления номинальные расстояния l_1 и l_2' от торцов диафрагмы до оси отверстий для отбора давления равно $25,4 \text{ мм}$.

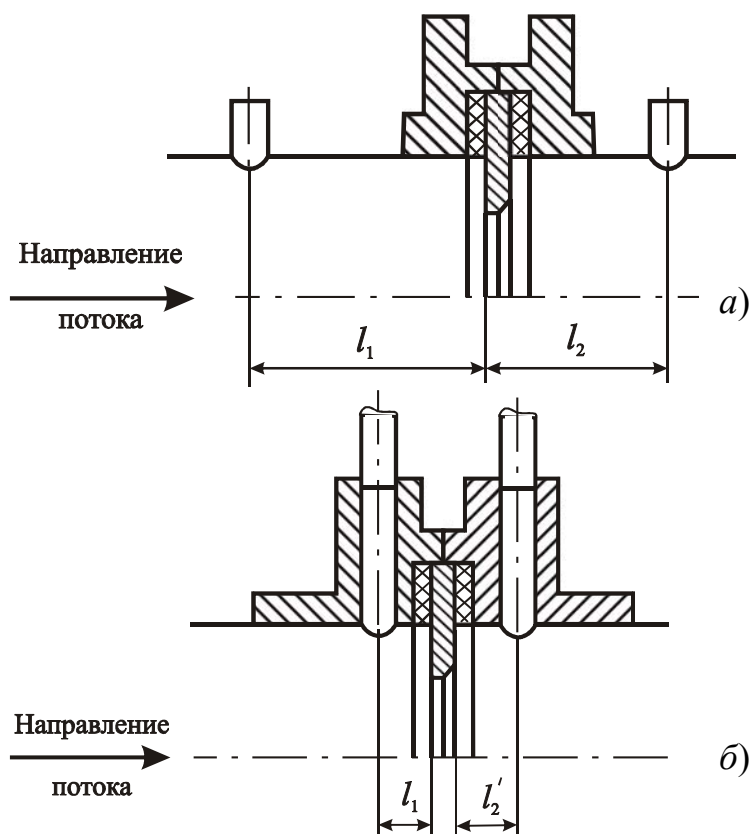


Рис. 1.6. Расположение отверстий для трехрадиусного и фланцевого способов отбора давления:
а) трехрадиусный отбор давления;
б) фланцевый отбор давления

Кромки отверстий для отбора давлений должны быть заподлицо с внутренней поверхностью ИТ и, насколько возможно, острыми. Для исключения заусенцев на внутренних кромках отверстий допускается их притупление радиусом не более $1/10$ диаметра отверстия для отбора давления. Диаметр отверстий для отбора давления должен быть не более $0,13 D$ и не превышать 13 мм. При определении диаметра отверстия учитывают возможность его засорения и необходимость обеспечения удовлетворительных динамических характеристик.

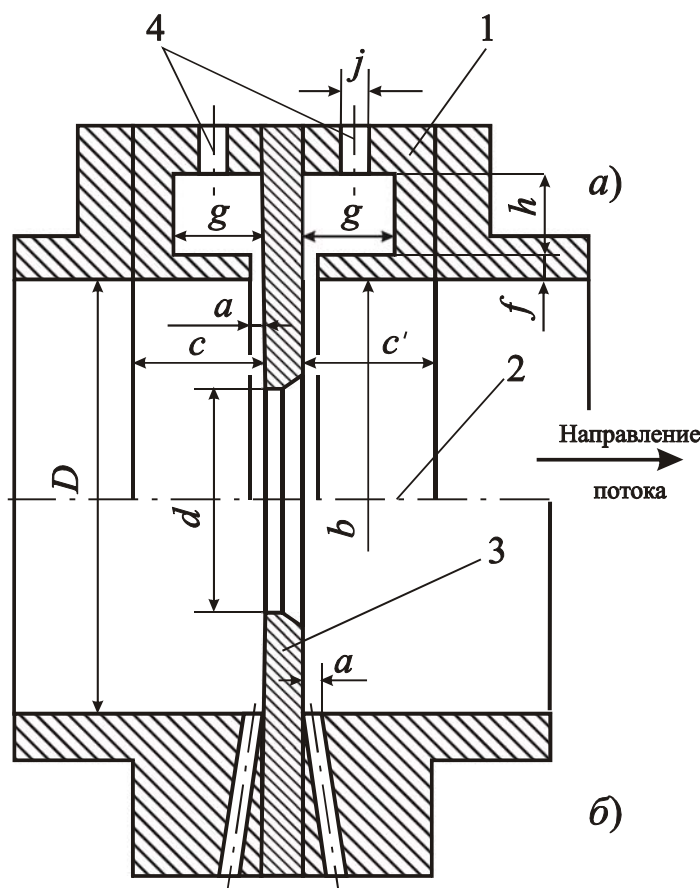


Рис. 1.7. Угловой отбор давления:
а) корпус кольцевой камеры с кольцевой щелью для отбора давления;
б) отдельные отверстия для отбора давления; 1 – корпус кольцевой камеры; 2 – ось диска диафрагмы; 3 – диск диафрагмы; 4 – отверстия для отбора давления

Для каждого СУ предусматривают, как минимум, одно отверстие для отбора давления перед СУ и одно – за ним. Допускается применять несколько способов отбора давления на одной стандартной диафрагме.

При угловом способе отбора давления (см. рис. 1.7) расстояние между осями отверстий для отбора давления и соответствующими торцами диафрагмы равно половине диаметра или половине ширины самих отверстий. В месте выхода во внутреннюю полость ИТ отверстие касается торца диафрагмы. Отбор давления может быть проведен как через отдельные отверстия, так и через кольцевые щели.

Отдельные отверстия для отбора давления могут быть выполнены как в трубопроводе, так и в его фланцах. Местом отбора давления при наличии кольцевой щели является отверстие в корпусе кольцевой камеры. Значения наименьшего диаметра a отдельных отверстий или ширины a кольцевых щелей определяются требованиями предотвращения засорения и обеспечения удовлетворительных динамических характеристик. Эти значения находят из условий:

$$0,005D \leq a \leq 0,03D \text{ при } \beta \leq 0,65; \quad (1.3)$$

$$0,01D \leq a \leq 0,02D \text{ при } \beta > 0,65. \quad (1.4)$$

Независимо от значения β значение диаметра a должно удовлетворять следующим требованиям:

- для жидкостей и газов $1 \text{ мм} \leq a \leq 10 \text{ мм}$
- для паров в случае применения кольцевых камер $1 \text{ мм} \leq a \leq 10 \text{ мм}$
- для паров и сжиженных газов в случае применения отдельных отверстий для отбора давления $4 \text{ мм} \leq a \leq 10 \text{ мм}$

Кольцевые щели выполняют сплошными или прерывистыми по всему периметру поперечного сечения ИТ. Каждая кольцевая камера должна сообщаться с внутренней полостью ИТ с помощью не менее четырех отверстий, оси которых образуют равные углы между собой. Площадь каждого отверстия должна составлять не менее 12 мм^2 .

Длина корпуса s кольцевой камеры перед диском диафрагмы и длина s' за диафрагмой должны быть не более $0,65 D$. Площадь сечения gh кольцевой камеры должна быть равна (или более) половине общей площади щели, соединяющей эту камеру с внутренней полостью ИТ. Внутренний диаметр кольцевой камеры b должен быть больше или равен внутреннему диаметру D ИТ. Толщина стенки камеры f должна быть равна или более $2 a$. Диаметр отверстий j для отбора давления из кольцевых камер должен быть от 4 до 10 мм.

Если имеется несколько отдельных отверстий для отбора давления в одном поперечном сечении ИТ перед и за диафрагмой, их оси должны образовать между собой равные углы.

Более подробные сведения по установке, размерам диафрагм и предъявляемым к ним требования приведены в [1].

Стандартные диафрагмы применяют для определения расхода при условиях, приведенных в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Условия применения стандартных диафрагм

Параметр	Способ отбора	
	фланцевый и трехрадиусный	угловой
Относительный диаметр	$0,2 \leq \beta \leq 0,75$	$0,2 \leq \beta \leq 0,75$
Число Рейнольдса	$1260\beta^2 D \leq Re \leq 10^8$	$5000 \leq Re < 10^8$ при $0,2 \leq \beta \leq 0,45$; $10\,000 \leq Re \leq 10^8$ при $\beta > 0,45$;
Примечание. Величина диаметра D выражена в миллиметрах		

1.3. Сопла ИСА-1932

Вид стандартного сопла ИСА-1932 показан на рис. 1.8.

Стандартное сопло состоит из сужающейся части с закругленным профилем и цилиндрической части – горловины.

Профильная часть сопла имеет:

- входную торцовую плоскость A , перпендикулярную к осевой линии сопла;
- сужающуюся часть, профиль которой образован дугами окружностей B и C ;

- цилиндрическую часть – горловину E ;
- кольцевой выступ F , предохраняющий выходную кромку от повреждения.

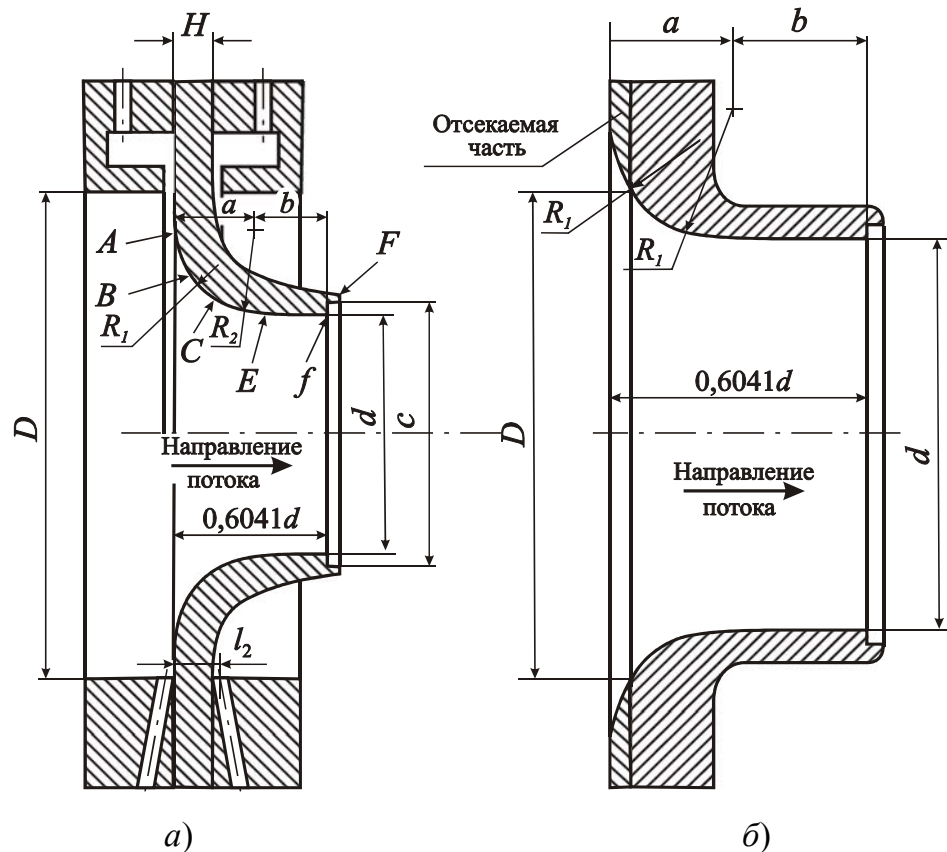


Рис. 1.8. Сопло ИСА-1932:

а) отношение $d/D \leq 2/3$; б) отношение $d/D > 2/3$

Входная торцовая плоскость A ограничена окружностью диаметром $3d/2$ и внутренним периметром трубопровода, диаметр которого равен D (см. рис. 1.8 а).

Дуга окружности B касается плоскости A при $d \leq 2D/3$. Радиус R_1 равен $0,2 d \pm 10 \%$ при $\beta < 0,5$ и $0,2 d \pm 3 \%$ при $\beta \geq 0,5$. Центр этой окружности находится на расстоянии $0,2 d$ от входного торца и на расстоянии $0,75 d$ от оси сопла.

Дуга окружности C касается дуги окружности B и горловины E . Ее радиус R_2 равен $d/3 \pm 10 \%$ при $\beta < 0,5$ и $d/3 \pm 3 \%$ при $\beta \geq 0,5$. Центр этой окружности расположен на расстоянии $d/2 + d/3 = 5d/6$ от оси и на расстоянии a от входного торца:

$$a = \frac{12 + 39^{0,5}}{60} d = 0,3041 d. \quad (1.5)$$

Горловина E имеет диаметр d и длину $b = 0,3 d$. Горловина должна быть цилиндрической. Допускаемое отклонение – не более $0,05 \%$.

Выступ F образован расточкой выходного торца диаметром $c = 1,06 d$ и глубиной, равной или менее $0,03 d$. Отношение $(c - d)/2$ к глубине расточки должно быть не более $1,2$. Выходная кромка f сопла должна быть острой.

Общая длина сопла без расточки составляет $0,6041 d$ при $d \leq 2D/3$. При $d > 2D/3$ общая длина сопла укорачивается из-за усеченности входной части.

Параметр шероховатости поверхности входного торца и горловины сопла $Ra < 10^{-4}d$.

Толщина H стенки сопла должна быть не более $0,1 D$.

Перед соплом применяют угловой отбор давления. За соплом может быть применен угловой отбор давления или отбор давления через отверстие, расположенное на расстоянии l_2 от входного торца сопла до оси отверстия для отбора давления при условиях:

$$l_2 \leq 0,15D \text{ для } \beta \leq 0,67 \text{ и } l_2 \leq 0,2D \text{ для } \beta > 0,67. \quad (1.6)$$

Сопла ИСА-1932 применяют при условиях:

$$50 \leq D \leq 500 \text{ мм}; 0,3 \leq \beta \leq 0,8; \quad (1.7)$$

$$7 \cdot 10^4 \leq Re \leq 10^7 \text{ при } 0,3 \leq \beta < 0,44; \quad (1.8)$$

$$2 \cdot 10^4 \leq Re \leq 10^7 \text{ при } 0,44 \leq \beta < 0,8. \quad (1.9)$$

При этом относительная шероховатость ИТ должна быть не более $3 \cdot 10^{-3}$.

1.4. Трубы и сопла Вентури

Разрез трубы Вентури в плоскости, проходящей через ее ось, показан на рис. 1.9.

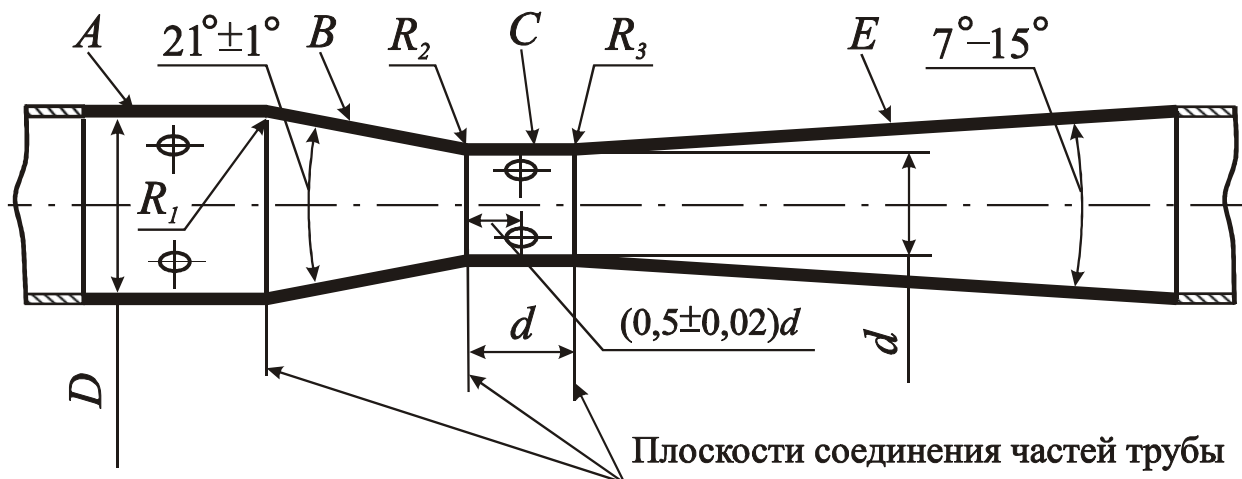


Рис. 1.9. Геометрический профиль трубы Вентури

Классические трубы Вентури. Имеются три следующие разновидности классических труб Вентури.

1. Классическая труба Вентури с литой (без обработки) входной конической частью. Трубу изготавливают литьем без последующей обработки входной конической части сопла. Горловину сопла обрабатывают, а места перехода между коническими и цилиндрическими элементами закругляют. Эту трубу применяют при условиях:

$$100 \text{ мм} \leq D \leq 800 \text{ мм}; 0,3 \leq \beta \leq 0,75; 2 \cdot 10^5 \leq Re \leq 2 \cdot 10^6. \quad (1.10)$$

2. Классическая труба Вентури с обработанной входной конической частью. Трубу изготавливают литьем. Входной конус, горловину и входную цилиндриче-

скую часть обрабатывают. Переходы между коническими и цилиндрическими элементами могут быть выполнены с закруглениями и без них. Эту трубу применяют при условиях:

$$50 \text{ мм} \leq D \leq 250 \text{ мм}; 0,4 \leq \beta \leq 0,75; 2 \cdot 10^5 \leq Re \leq 1 \cdot 10^6. \quad (1.11)$$

3. Классическая труба Вентури со сварной (без обработки) входной конической частью из листовой стали. Такую трубу обычно изготавливают сваркой. Трубы больших диаметров не имеют механической обработки. В трубах малого диаметра обрабатывают горловину. Эту трубу применяют при условиях:

$$200 \text{ мм} \leq D \leq 1200 \text{ мм}; 0,4 \leq \beta \leq 0,70; 2 \cdot 10^5 \leq Re \leq 2 \cdot 10^6. \quad (1.12)$$

Классическая труба Вентури состоит из входного цилиндрического участка A , соединенного с сужающейся конической частью B , цилиндрической горловины C и диффузора E .

Диаметр D входного цилиндрического участка A не должен отличаться от внутреннего диаметра ИТ более чем на $0,01 d$.

Диаметр D входного цилиндрического участка в любой его точке не должен отличаться более чем на $0,4 \%$ от среднего значения.

Сходящаяся часть B трубы Вентури любого вида должна быть конической с углом конуса $21^\circ \pm 1^\circ$. Общая длина входного конуса B , измеренная параллельно оси трубы Вентури, приблизительно равна $2,7(D - d)$. Место перехода конуса B в цилиндрический участок A имеет радиус R_1 , значение которого зависит от разновидности классической трубы Вентури.

Отклонение профиля входного конуса от профиля шаблона в любом месте конусной части не должно превышать $\pm 0,4 \%$ диаметра ИТ.

Горловина C должна быть цилиндрической диаметром d . Длина горловины C должна быть равна d независимо от разновидности классической трубы Вентури.

В месте соединения горловины C с входным конусом радиус сопряжения – R_2 , а в месте сопряжения с диффузором E – R_3 .

Диаметр горловины в любой ее точке не должен отличаться от среднего значения более чем на $\pm 0,1 \%$.

Расходящаяся часть E должна быть конической и иметь угол конуса от 7° до 15° . Оптимальный угол конуса выбирают от 7° до 8° .

Минимальный диаметр расходящейся конической части E должен быть не менее диаметра горловины.

Классическую трубу Вентури называют «укороченной», если выходной диаметр диффузора меньше диаметра ИТ. Диффузор может быть укорочен на 35% . При этом потеря давления в сопле изменяется незначительно.

Значение параметра шероховатости Ra горловины и радиусов сопряжения должно быть не более $10^{-5}d$.

Для профильной части трубы Вентури с необработанной поверхностью должны выполняться следующие требования.

1. Значение параметра шероховатости конической секции B должно быть не более $10^{-4}D$. Внутреннюю поверхность входного участка A можно не обрабаты-

вать, если ее качество такое же, как и качество поверхности входной конической части B .

2. Минимальная длина входного цилиндрического участка A равна наименьшему из двух следующих значений: $1 D$ или $0,25 D + 250$ мм. Радиусы сопряжения:

$$R_1 = 1,375D \pm 20 \% ; \quad (1.13)$$

$$R_2 = 3,625d \pm 0,125d. \quad (1.14)$$

3. Длина цилиндрического участка горловины должна быть не менее $d/3$. Кроме того, длина цилиндрической части, находящейся между концом радиуса сопряжения R_2 и плоскостью, проходящей через оси отверстий для отбора давления, так же, как и длина цилиндрической части между плоскостью, проходящей через оси отверстий для отбора давления, и началом радиуса сопряжения R_3 должна быть не менее $d/6$.

4. Радиус сопряжения R_3 должен быть равным от $3 d$ до $15 d$.

Характеристики профильной части классической трубы Вентури с обработанной входной конической частью должны удовлетворять следующим требованиям.

1. Минимальная длина цилиндрического участка A должна быть равна D .

2. Радиус R_1 должен быть менее $0,25 D$; радиус R_2 – менее $0,25 d$. Оптимальное значение равно нулю.

3. Длина цилиндрической части горловины от конца кривой R_2 до плоскости, проходящей через оси отверстий для отбора давления, должна быть не менее $0,25 d$. Длина цилиндрической части горловины от конца кривой R_3 до плоскости, проходящей через оси отверстий для отбора давления, должна быть не менее $0,3 d$.

4. Радиус R_3 должен быть менее $0,25 d$. Оптимальное значение радиуса равно нулю.

Характеристики профильной части классической трубы Вентури со сварной необработанной входной конической частью из листовой стали должны удовлетворять следующим требованиям.

1. Минимальная длина цилиндрического участка A должна быть равна D .

2. Между цилиндрическим участком A и входным конусом B не должно быть переходных кривых, кроме образуемых в результате сварки. Между входным конусом B и горловиной C не должно быть переходных кривых, кроме образуемых в результате сварки. Между горловиной и диффузором не должно быть переходных кривых.

3. Внутренняя поверхность цилиндрического участка A и входного конуса должна быть чистой, без отложений и наплывов сварки. Значение параметра шероховатости Ra должно быть равно $5 \cdot 10^{-4} D$.

Не допускается уступа между горловиной и конической частью диффузора.

Отверстия для отбора давления на входе трубы и в горловине выполняют в виде отдельных отверстий в стенке ИТ, соединенных между собой кольцевой камерой или кольцевой трубкой. Диаметр отверстий должен быть от 4 до 10 мм, но не более $0,1 D$ для отбора на входе трубы и не более $0,13 d$ для отбора в горловине.

На входе в трубу и в горловине должно быть не менее чем по четыре отверстия. Оси отверстий образуют между собой равные углы и располагаются в плоскости, перпендикулярной к оси трубы Вентури.

В классической трубе Вентури с литой необработанной входной конической частью расстояние между отверстиями для отбора давления, расположенными на входном цилиндрическом участке, и плоскостью пересечения продолжения входного конуса B с входным цилиндром A должно быть равно

$$0,5D \pm 0,25D \text{ для } 100 \text{ мм} \leq D \leq 150 \text{ мм} \quad (1.15)$$

и

$$0,5D_{-0,25D}^{+0} \text{ для } 150 \text{ мм} \leq D \leq 800 \text{ мм}. \quad (1.16)$$

В классической трубе Вентури с обработанной входной конической частью и со сварным конусом (без обработки) из листовой стали расстояние между отверстиями для отбора давления и плоскостью пересечения входного цилиндра A с входным конусом B должно быть равно

$$0,5D \pm 0,05D. \quad (1.17)$$

В классической трубе Вентури всех разновидностей расстояние между отверстиями для отбора давления в горловине и плоскостью пересечения входного конуса B с горловиной C должно быть равно

$$0,5d \pm 0,02d. \quad (1.18)$$

Сопла Вентури. Сопла Вентури применяют при условиях:

$$65 \text{ мм} \leq D \leq 500 \text{ мм}; d \geq 50 \text{ мм}; 0,316 \leq \beta \leq 0,775; 1,5 \cdot 10^5 \leq Re \leq 2 \cdot 10^6. \quad (1.19)$$

Профиль сопла Вентури (рис. 1.10) состоит из сужающейся части с закругленным профилем, цилиндрической горловины и диффузора.

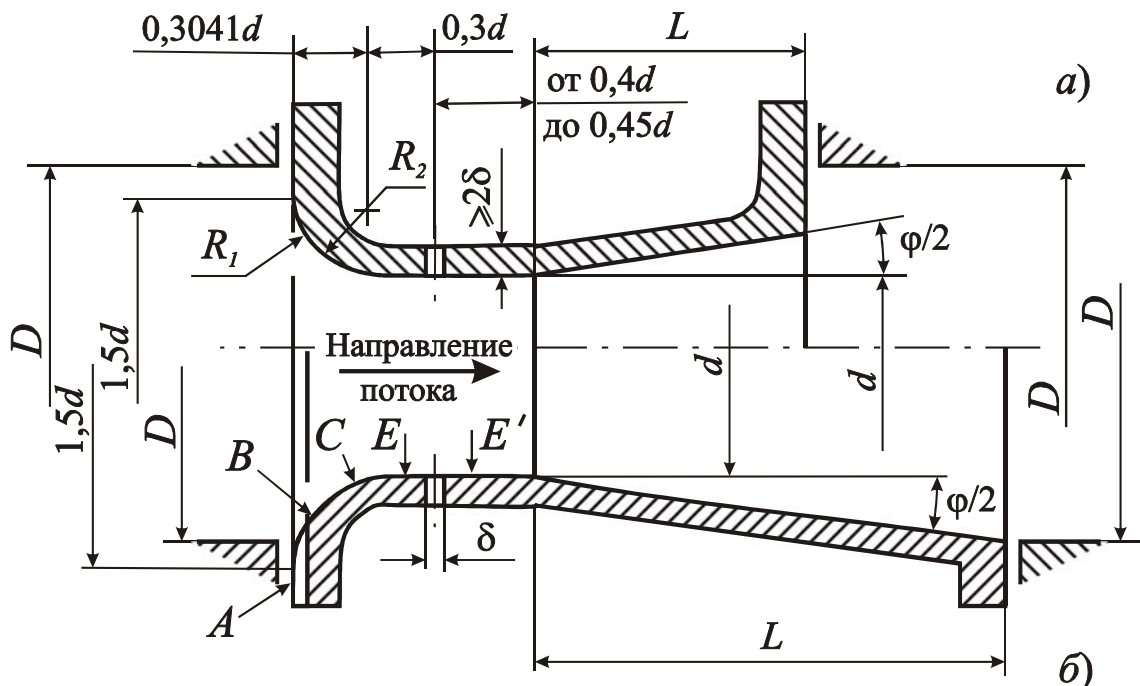


Рис. 1.10. Сопло Вентури: а) укороченный диффузор $d/D \leq 2/3$; б) неукороченный диффузор $d/D > 2/3$

Входной торец сопла Вентури аналогичен торцу сопла ИСА-1932 (см. рис. 1.8). Горловина сопла Вентури состоит из части E , аналогичной части сопла ИСА-1932, длиной $0,3 d$ и части E' длиной от $0,4 d$ до $0,45 d$.

Горловина должна быть цилиндрической, допускаемое отклонение не более $\pm 0,05 \%$.

Диффузор (см. рис. 1.10) должен быть соединен с частью E без радиусного сопряжения. Заусенцы должны быть сняты. Угол конусности φ диффузора должен быть равным или менее 30° .

Длина диффузора практически не оказывает никакого влияния на коэффициент истечения C . Однако потеря давления зависит от угла конусности диффузора и от его длины.

Сопло Вентури может быть укороченным, если выходной диаметр диффузора меньше D . Сопло не считают укороченным, если выходной диаметр диффузора равен D . Диффузор может быть укорочен на 35% . При этом потеря давления в сопле изменяется незначительно.

Внутренняя поверхность сопла Вентури должна иметь параметр шероховатости $Ra \leq 10^{-4} d$.

Отверстия для отбора давления перед соплом Вентури могут быть выполнены по способу углового отбора, аналогично соплу ИСА-1932, как указано на рис. 1.11.

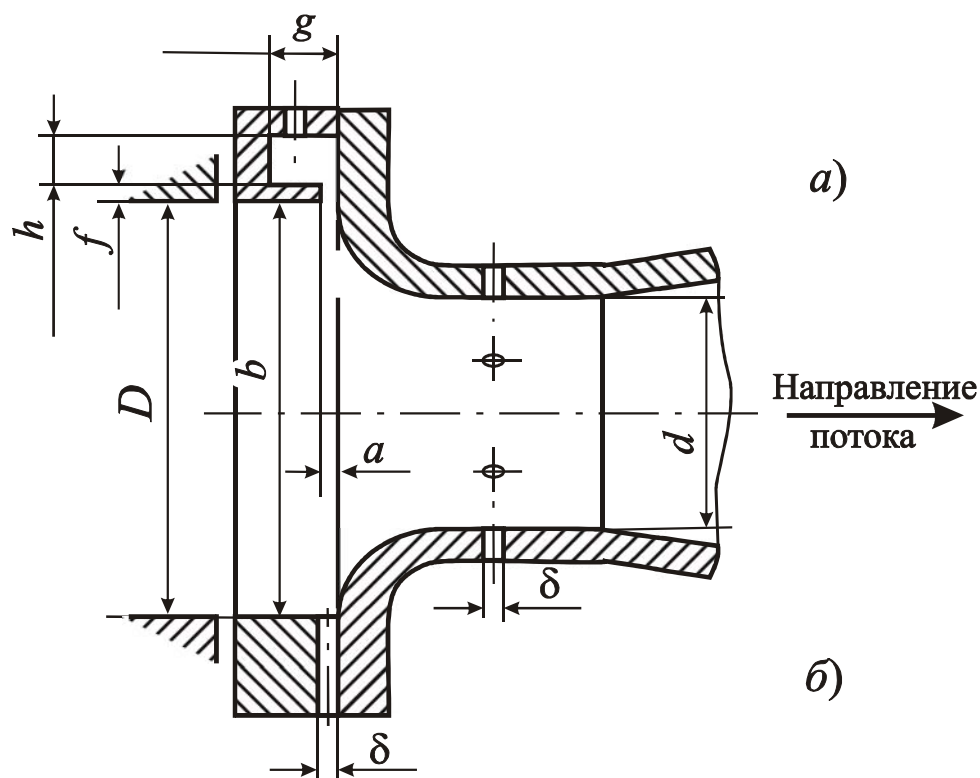


Рис. 1.11. Виды отборов давления для сопел Вентури:
а) с кольцевой щелью; б) с отверстиями

Оси отверстий для отбора давления располагают в любом угловом секторе ИТ. Отбор давления в горловине производят через отдельные отверстия, соединенные

с кольцевой камерой или с кольцевой трубкой. Отверстий должно быть не менее четырех. Использование для отбора давления сплошных или прерывистых кольцевых щелей не допускается.

Оси этих отверстий должны образовать между собой равные углы и быть расположены в плоскости, перпендикулярной к оси сопла и представляющей собой воображаемую границу между частями E и E' (см. рис. 1.10) цилиндрической горловины.

Диаметр отверстий для отбора давления δ в горловине должен быть равен или менее $0,04d$, но от 2 до 10 мм.

1.5. Принцип определения расхода с применением стандартных сужающих устройств

Рассмотрим закон сохранения энергии стационарного потока, протекающего по измерительному трубопроводу

$$p_1 + \rho u_D^2 / 2 = p_2 + \rho u_d^2 / 2, \quad (1.20)$$

где u_D – скорость течения потока в трубопроводе на входе в СУ; u_d – скорость течения потока в отверстии СУ; p_1 – давление на входе в СУ; p_2 – давление на выходе из СУ; ρ – плотность несжимаемой жидкости; d – диаметр отверстия (или горловины) СУ; D – диаметр измерительного трубопровода.

Уравнение неразрывности потока несжимаемой среды для рассматриваемого участка измерительного трубопровода имеет вид

$$\rho u_D \pi D^2 / 4 = \rho u_d \pi d^2 / 4 = q_m, \quad (1.21)$$

где q_m – массовый расход среды, протекающей по измерительному трубопроводу.

Из (1.20) и (1.21) следует

$$q_m = E(\pi d^2 / 4)(2\rho \Delta p)^{1/2}, \quad (1.22)$$

где E – коэффициент скорости входа; $\Delta p = (p_1 - p_2)$ – перепад давления на СУ,

$$E = \frac{1}{\left[1 - (u_D / u_d)^2\right]^{1/2}} = \frac{1}{\left[1 - (d / D)^4\right]^{1/2}} = 1 / (1 - \beta^4)^{1/2}; \quad (1.23)$$

ρ – плотность несжимаемой жидкости.

Действительный массовый расход получается меньше рассчитанного по теоретическому уравнению расхода (1.22), что корректируется коэффициентом истечения C и дополнительно коэффициентом расширения ε для сжимаемых сред. Тогда уравнение расхода принимает вид

$$q_m = EC\varepsilon(\pi d^2 / 4)(2\rho \Delta p)^{1/2}. \quad (1.24)$$

Значения E и C для стандартных сужающих устройств определены в результате экспериментальных исследований, проведенных на гидравлически гладких трубопроводах при равномерном распределении скоростей потока по сечению трубопровода и развитом турбулентном режиме течения этого потока. При исследованиях применяли диафрагмы с острой входной кромкой.

Наличие местных гидравлических сопротивлений (трубопроводной арматуры, отводов и т.д.) и применение шероховатых трубопроводов приводят к искажению распределения скорости по их сечению. Для выравнивания распределения скоростей по сечению ИТ, неравномерность которого обусловлена наличием местных сопротивлений, при использовании стандартных сужающих устройств применяют прямые участки трубопроводов определенной длины.

Влияние шероховатости невозможно исключить подобным конструктивным путем. Поэтому влияние шероховатости ИТ на значение коэффициента истечения корректируют с помощью поправочного коэффициента на шероховатость внутренней поверхности ИТ $K_{ш}$.

Влияние на коэффициент истечения притупления входной кромки отверстия диафрагмы, обусловленного ее износом, корректируют с помощью поправочного коэффициента на притупление входной кромки отверстия диафрагмы $K_{п}$.

Таким образом, уравнение массового расхода в общем случае примет вид

$$q_m = ECK_{ш}K_{п}\varepsilon(\pi d^2/4)(2\rho\Delta p)^{1/2}. \quad (1.25)$$

2. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА СРЕДЫ ПО ВЕЛИЧИНЕ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ НА СТАНДАРТНОМ СУ

2.1. Расчет расхода среды

Практически вычисление расхода по величине замеренного на СУ перепада давления производится следующим образом.

1. Определяются диаметры трубопровода D и СУ d при рабочих условиях (при температуре рабочей среды t):

$$D = D_{20}[1 + \gamma(t - 20)]; \quad (2.1)$$

$$d = d_{20}[1 + \gamma(t - 20)]. \quad (2.2)$$

Здесь γ – коэффициент линейного расширения материала СУ и трубопровода; D_{20} , d_{20} – диаметр трубопровода и отверстия СУ при температуре 20 °С.

Значения температурного коэффициента линейного расширения γ различных материалов для широкого диапазона температур могут быть рассчитаны с погрешностью 10 % по формуле

$$\gamma = 10^{-6} [a_e + 10^{-3}tb_e - 10^{-6}t^2c_e], \quad (2.3)$$

где a_e , b_e , c_e – постоянные коэффициенты в соответствующих им диапазонах температур, приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Значения коэффициентов формулы (2.3) для температур от минус 200 до плюс 700 °С

Марка стали	a_e	b_e	c_e	Марка стали	a_e	b_e	c_e
8	10,9	7,7	2,4	I2MX	11,3	3,8	0,0
10	10,8	9,0	4,2	12X1МФ	10,0	9,6	6,0

Марка ста- ли	a_e	b_e	c_e	Марка стали	a_e	b_e	c_e
15	11,1	7,9	3,9	12X17	9,4	7,4	6,0
15M	10,7	13,0	13,0	I2X18H9T	15,6	8,3	6,5
I6M	11,1	8,4	3,7	I2X18H10T	15,6	8,3	6,5
20	11,1	7,7	3,4	14XI7H2	9,4	7,5	7,8
20M	10,7	13,0	13,0	15XMA	11,1	8,5	5,2
25	12,2	0,0	0,0	15X1M1Ф	10,4	8,1	4,4
30	10,2	10,4	5,6	I5X5M	10,1	2,7	0,0
35	10,2	10,4	5,6	15X12ЕНМФ	9,8	3,0	0,0
X6CM	10,1	2,7	0,0	17X18H9	15,7	5,7	0,0
X7CM	10,1	2,7	0,0	20X23H13	15,5	1,7	0,0
				36X18H25C2	12,0	10,0	5,4

2. Определяется величина β по формуле (1.2).

3. Определяется E по формуле (1.23).

4. Определяется плотность среды ρ при рабочих условиях по результатам замеров параметров состояния (температура, давление, влажность и т.п.) либо путем непосредственного замера плотности согласно раздела 3.

5. Определяется массовый расход при $C = C_\infty$ по формуле

$$q_{m\infty} = EC_\infty K_{\text{ш}} K_{\text{п}} \varepsilon (\pi d^2 / 4) (2\rho \Delta p)^{1/2}, \quad (2.4)$$

где ρ – плотность среды в рабочих условиях; C_∞ – коэффициент истечения при числе Рейнольдса $Re \rightarrow \infty$.

Для диафрагм коэффициент C_∞ определяется по формуле

$$C_\infty = 0,5959 + 0,0312\beta^{2,1} - 0,1840\beta^8 + 0,090L_1\beta^4(1-\beta^4)^{-1} - 0,0337L_2\beta^3. \quad (2.5)$$

Здесь $L_1 = l_1/D$ – отношение расстояния от входного торца диафрагмы до оси отверстия для отбора давления перед диафрагмой к диаметру ИТ; $L_2 = l_2/D$ – отношение расстояния от выходного торца диафрагмы до оси отверстия для отбора давления за диафрагмой к диаметру ИТ. Эти величины принимают по табл. 2.2.

Таблица 2.2

Величины относительных расстояний от отверстий для отбора давлений
до диафрагмы

Способ отбора	Угловой	Трехрадиусный	Фланцевый
L_1	0	1	$25,4/D$
L_2	0	0,47	$25,4/D$
Примечание. Величина диаметра D должна быть выражена в миллиметрах			

Для стандартных сопел коэффициент C_∞ определяется по формуле

$$C_\infty = 0,9900 - 0,2262\beta^{4,1}. \quad (2.6)$$

Значения коэффициента C_∞ для труб и сопел Вентури приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Значения коэффициента C_∞ для труб и сопел Вентури

Входной конус трубы Вентури	Число Re	C_∞
Труба Вентури с литым входным конусом	$4 \cdot 10^4 \leq Re \leq 2 \cdot 10^5$	0,991
Труба Вентури с обработанным входным конусом	$5 \cdot 10^4 \leq Re \leq 5 \cdot 10^5$	1,00
Труба Вентури со сварным входным конусом	$4 \cdot 10^4 \leq Re \leq 2 \cdot 10^5$	0,992
Сопло и труба Вентури любого типа	$> 2 \cdot 10^5$	1,00

Поправку на влияние шероховатости стенки измерительного трубопровода $K_{ш}$ в (2.4) определяется следующим образом:

$$K_{ш} = 1 + \beta^4 r_0 A_{Re}, \quad (2.7)$$

где
$$r_0 = 0,07 \lg \left(\frac{R_{ш}}{D} 10^4 \right) - 0,04. \quad (2.8)$$

Величина абсолютной эквивалентной шероховатости $R_{ш}$ принимается по данным табл. 2.4.

Таблица 2.4

Значения эквивалентной шероховатости внутренней поверхности различных трубопроводов

Материал	Состояние внутренней поверхности трубопровода	$R_{ш}$, мм
Латунь, медь, алюминий, пластмассы, стекло, свинец	Новая без осадков	$< 0,03$
Сталь	Новая бесшовная: – холоднотянутая – горячетянутая – прокатная Новая сварная С незначительным налетом ржавчины Ржавая Битуминированная: – новая – бывшая в эксплуатации	$< 0,03$ $< 0,1$ $< 0,1$ $< 0,1$ $< 0,2$ $< 0,3$ $< 0,05$ $< 0,2$
	Оцинкованная: – новая – бывшая в эксплуатации	$< 0,15$ $0,18$
Чугун	Новая Ржавая С накипью Битуминированная, новая	$0,25$ $< 1,2$ $< 1,5$ $< 0,05$
Асбоцемент	Облицованная и необлицованная, новая Необлицованная, в обычном состоянии	$< 0,03$ $0,05$

Величина поправки на число Рейнольдса в (2.7) принимается равной:

$$A_{Re} = 0,5. \quad (2.9)$$

Поправка на шероховатость ИТ не учитывается, если выполнено условие:

- для стандартных диафрагм

$$\frac{R_{ш}}{D} 10^4 \leq 10^{\frac{1}{14} [1/(10\beta^2) - 8]}; \quad (2.10)$$

- для стандартных сопел ИСА, труб и сопел Вентури

$$\frac{R_{ш}}{D} 10^4 \leq 10^{\frac{1}{9} [1/(10\beta)^4 + 5]}. \quad (2.11)$$

В этом случае

$$K_{ш} = 1. \quad (2.12)$$

Поправка на притупление входной кромки отверстия диафрагмы $K_{п}$ в формуле (2.4) при $d < 125$ мм вычисляется по формуле (при $d \geq 125$ мм $K_{п} = 1$)

$$K_{п} = 1,0547 - 0,0575 e^{149 \bar{r}_k / d}, \quad (2.13)$$

где \bar{r}_k – средний за межповерочный интервал радиус закругления входной кромки диафрагмы, который рассчитывается по формуле

$$\bar{r}_k = 0,195 - (0,195 - r_n)(1 - e^{-\tau_{п.п}/3})(3/\tau_{п.п}). \quad (2.14)$$

Здесь r_n – начальное значение радиуса закругления входной кромки диафрагмы, определяемое путем измерений или принимаемое равным 0,05 при $\tau = 0$; $\tau_{п.п}$ – межповерочный интервал, годы.

При $\tau_{п.п} = 1$ год

$$\bar{r}_k = 0,0292 + 0,85 r_n. \quad (2.15)$$

Коэффициент расширения ε в формуле (2.4) для стандартных диафрагм при использовании любого из трех стандартных способов отбора давления определяют по эмпирической формуле

$$\varepsilon = 1 - (0,41 + 0,35\beta^4)\Delta p / (kp), \quad (2.16)$$

где Δp – замеренный перепад давления на диафрагме; p – абсолютное давление перед диафрагмой; k – коэффициент адиабаты измеряемой газовой среды (сведения по физическим характеристикам некоторых газов, в том числе по коэффициенту адиабаты, приведены в разделе 3).

Для стандартных сопел ИСА, труб и сопел Вентури коэффициент расширения ε определяется по формуле

$$\varepsilon = \left[\frac{k\psi^{2/k}}{k-1} \frac{1-\beta^4}{1-\beta^4\psi^{2/k}} \frac{1-\psi^{(k-1)/k}}{1-\psi} \right]^{1/2}, \quad (2.17)$$

где $\psi = 1 - \Delta p / p$.

6. Рассчитывается число Рейнольдса Re_{∞} при массовом расходе $q_{m\infty}$ по формуле

$$Re_{\infty} = \frac{4q_{m\infty}}{\pi\mu D}. \quad (2.18)$$

Определение коэффициента динамической вязкости для различных сред описано в разделе 3.

7. Определяется поправочный коэффициент K_{Re} , учитывающий влияние конечной величины числа Рейнольдса на коэффициент истечения. Для стандартных диафрагм K_{Re} вычисляется по формуле

$$K_{Re} = 1 + \frac{1,426}{1 + \frac{C_{\infty}(Re_{\infty})^{0,75}}{64,28\beta^{2,5}}} \cdot \quad (2.19)$$

Формулы для определения поправочного коэффициента на число Рейнольдса K_{Re} для стандартных сопел, труб и сопел Вентури приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Зависимости для определения коэффициента K_{Re} для стандартных сопел, труб и сопел Вентури

Вид СУ	Число Re	Коэффициент K_{Re}
Сопло ИСА	В соответствии с (1.8), (1.9)	$1 + \frac{0,86}{1 + \frac{C_{\infty}Re_{\infty}^{1,15}}{923,9\beta^2(33\beta^{2,15} - 17,5)}}$
Труба Вентури с литым входным конусом	$4 \cdot 10^4 \leq Re \leq 2 \cdot 10^5$	$0,5 + \left[0,25 - \frac{0,0014 \cdot 10^6}{C_{\infty}Re_{\infty}} \right]^{0,5}$
Труба Вентури с обработанным входным конусом	$5 \cdot 10^4 \leq Re \leq 5 \cdot 10^5$	$1,0091 \left[\frac{\beta \cdot 10^6}{Re_{\infty}} \right]^{-0,0132}$
Труба Вентури со сварным входным конусом	$4 \cdot 10^4 \leq Re \leq 2 \cdot 10^5$	$0,5 + \left[0,25 - \frac{0,0013 \cdot 10^6}{C_{\infty}Re_{\infty}} \right]^{0,5}$
Труба Вентури с литым входным конусом	$> 2 \cdot 10^5$	0,984
Труба Вентури с обработанным входным конусом	$> 5 \cdot 10^5$	0,995
Труба Вентури со сварным входным конусом	$> 2 \cdot 10^5$	0,985
Сопло Вентури	В соответствии с (1.19)	$0,9858 - 0,196 \beta^{4,5}$

8. Определяется действительное число Рейнольдса по уравнению

$$Re = Re_{\infty} K_{Re} \cdot \quad (2.20)$$

9. Если поправочный коэффициент на шероховатость стенок трубопровода, определенный в п. 5, $K_{ш} \neq 1$, находится действительное значение коэффициента шероховатости $K'_{ш}$. Для этого используется формула (2.7), в которой коэффициент A_{Re} определяется с использованием формул

$$A_{Re} = 1 - \frac{(\lg Re - 6)^2}{4} \text{ при } 10^4 < Re < 10^6; \quad (2.21)$$

$$A_{Re} = 1 \text{ при } Re > 10^6. \quad (2.22)$$

При $Re < 10^4$ значение коэффициента $K'_{ш}$ принимают равным единице:

$$K'_{ш} = K_{ш} = 1. \quad (2.23)$$

10. Определяется действительное значение массового расхода по уравнению

$$q_m = q_{m \infty} K_{Re} K'_{ш} / K_{ш}. \quad (2.24)$$

11. Определяется значение объемного расхода в рабочих условиях q_o по уравнению

$$q_o = q_m / \rho. \quad (2.25)$$

12. Определяется значение объемного расхода, приведенного к стандартным условиям q_c , по уравнению

$$q_c = q_m / \rho_c, \quad (2.26)$$

где ρ_c – плотность среды в стандартных условиях.

2.2. Расчет потери давления на сужающем устройстве

Потеря давления на стандартной диафрагме и сопле представляет собой разность статических давлений у стенки ИТ:

- измеренного перед СУ в месте, где становится пренебрежимо малым влияние давления, обусловленного торможением входящего потока непосредственно у СУ (приблизительно $1D$);
- измеренного за СУ в месте, где можно считать полностью законченным процесс восстановления статического давления, обусловленного расширением струи (приблизительно $6D$ за СУ).

Потерю давления $\Delta\omega$ на диафрагме и стандартном сопле определяют по формуле

$$\Delta\omega = (1 - \beta^{1,9}) \Delta p. \quad (2.27)$$

Потерю давления на трубах и соплах Вентури определяют как разность перепадов давления на ИТ до $\Delta p'$ и после установки $\Delta p''$ трубы (сопла). В общем случае можно принять, что относительная потеря давления

$$\xi = \frac{\Delta p'' - \Delta p'}{\Delta p} = 5 \dots 20 \%. \quad (2.28)$$

2.3. Расчет погрешности определения расхода

2.3.1. Общие положения

Абсолютной погрешностью измерения параметра Δy называют разность измеренного y_i и действительного значения этого параметра, т.е.

$$\Delta y = y_i - y. \quad (2.29)$$

Относительной погрешностью измерения параметра δ называют отношение абсолютной погрешности измерения к действительному значению этого параметра:

$$\delta = \frac{\Delta y}{y} 100 = \left(\frac{y_i}{y} - 1 \right) 100. \quad (2.30)$$

Приведенной погрешностью средств измерений δ_0 называют отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению измеряемого параметра, например, к диапазону измерений:

$$\delta_0 = \frac{\Delta y}{y_B - y_H} 100, \quad (2.31)$$

где y_B, y_H – верхнее и нижнее предельное значение измеряемой величины соответственно.

Нормирование предела погрешности для средств измерений проводят в нормальных условиях и называют *пределом основной допускаемой погрешности* средств измерений. В ряде отечественных документов ее называют классом точности, в зарубежных – точностью или нелинейностью средств измерений.

Если известен предел основной приведенной погрешности средства измерений, то предел относительной погрешности может быть определен по формуле

$$\delta = \delta_0 \frac{y}{y_B - y_H}. \quad (2.32)$$

При непрерывных или многократных измерениях количественных параметров, произвольно изменяющихся во времени (при накоплении и суммировании результатов измерений), относительную погрешность измерений контролируемого параметра определяют для его среднего значения как наиболее вероятного. Это условие применяют, например, при определении объема, массы или энергосодержания* методом переменного перепада давления.

Значения объема, массы или энергосодержания, как правило, пропорциональны значению квадратного корня из перепада давления, плотности среды при рабочих условиях или давления и обратно пропорциональны значению квадратного корня из температуры и плотности при стандартных условиях. При этом средние значения $\overline{\Delta p}$, $\bar{\rho}$ и \bar{p} определяют по формуле

$$\bar{y} = \left(\frac{y_B^{0,5} - y_H^{0,5}}{2} \right)^2, \quad (2.33)$$

а значения \bar{T} и \bar{p}_c определяют по формуле

$$y = 4 \frac{y_B y_H}{\left(y_B^{0,5} + y_H^{0,5} \right)^2}, \quad (2.34)$$

* Под энергосодержанием понимают произведение массы горючего газа, прошедшего по трубопроводу за контролируемый отрезок времени, на удельную высшую теплоту его сгорания.

где y – соответственно средние значения измеряемых параметров $\overline{\Delta p}$, \bar{p} и \bar{p} , \bar{T} и \bar{p}_c ; y_v и y_n – соответственно верхнее и нижнее значения Δp , p , T и p_c .

Если измеряемый объем обратно пропорционален плотности измеряемой среды при стандартных условиях, то среднее значение p_c определяют по формуле

$$\bar{p}_c = \bar{y} = \frac{2y_v y_n}{y_v + y_n} = \frac{2\rho_{c.v} \rho_{c.n}}{\rho_{c.v} + \rho_{c.n}}. \quad (2.35)$$

Информация об оценке возможной погрешности измерений или доверительных границах полезна при исследованиях, связанных с нормированием режимов технологических процессов, при сопоставлении применимости различных средств измерений с различными метрологическими характеристиками, при рассмотрении разногласий по результатам измерений одного и того же потока двумя измерительными комплексами, при определении условно-постоянных параметров уравнения расхода и количества среды.

Верхнюю и нижнюю границы интервала, в котором находится с заданной доверительной вероятностью случайное отклонение результата измерений, называют *доверительными границами* случайного отклонения результата измерений.

2.3.2. Классификация погрешностей

Погрешности, которые рассматривают в данном пособии, подразделяют на следующие виды:

- случайные;
- систематические;
- неисключенные систематические.

При анализе результатов измерений могут быть обнаружены результаты, резко отличающиеся от остальной группы результатов измерений, обусловленные случайным нарушением условий измерений или (и) грубой ошибкой оператора при снятии показаний или (и) при проведении расчетов. Такие резкие отклонения называют *промахами* или *грубыми ошибками*. Промахи исключают из результатов измерений.

Составляющую погрешности, изменяющуюся случайным образом, закономерность возникновения которой не может быть определена при многократных измерениях одного и того же значения контролируемого параметра при неизменных условиях его определения, называют *случайной погрешностью*. Случайную составляющую погрешности оценивают средним квадратическим отклонением σ . В настоящей методике доверительные границы случайной составляющей погрешности определяют при нормальном законе распределения случайных погрешностей и доверительной вероятности 0,95, то есть $\bar{\delta}_y = \pm 2,0\bar{\sigma}_y$. Случайная погрешность уменьшается с увеличением количества измерений и стремится к нулю.

Составляющую погрешности измерений, остающуюся постоянной или закономерно изменяющуюся при многократных измерениях и неизменных условиях одного и того же значения контролируемого параметра, называют *систематической погрешностью*. Систематическая погрешность – это погрешность, значение

и знак которой известны. Известные систематические погрешности контролируемого параметра исключают из результата измерений.

Неисключенной систематической погрешностью называют часть систематической погрешности, которая остается не устраненной из результата измерений из-за сложности или (и) непредсказуемости изменения условий её определения. Неисключенная систематическая погрешность – такая погрешность, значение и знак которой не определены, но известны условия ее возникновения. При суммировании составляющих погрешности результата измерений неисключенные систематические погрешности рассматривают как случайные величины. Доверительные границы неисключенной систематической погрешности находят, принимая нормальный закон распределения неисключенных систематических погрешностей при доверительной вероятности 0,95. От случайной составляющей погрешности неисключенная систематическая составляющая отличается тем, что при многократных измерениях она остается неизменной и не стремится к нулю.

Предел допускаемой погрешности средства измерений – сумма систематической, неисключенной систематической и случайной погрешностей при доверительной вероятности 0,95. Сведения о значениях этих погрешностей должны предоставлять либо изготовитель, либо органы метрологического надзора.

При отсутствии данных о значениях составляющих погрешности принимают основную погрешность средства измерений с вероятностью 0,95 за неисключенную систематическую погрешность. Систематическую и случайную составляющие погрешности в этом случае принимают равными нулю, если значения вариаций, гистерезиса, повторяемости, стабильности и дрейфа неизвестны. Если значения последних характеристик известны, то случайную составляющую с вероятностью 0,95 определяют как квадратный корень из суммы квадратов значений этих характеристик.

Если в результате однократной поверки средства измерений установлено, что ни в одной точке проверяемого диапазона погрешность не превышает $1/3$ предела допускаемой основной погрешности этого средства, то с вероятностью 0,95 установленную погрешность принимают за случайную составляющую погрешности, а основную погрешность образцового средства измерений (рабочего эталона) принимают за неисключенную систематическую составляющую погрешности, если неизвестны такие характеристики образцового средства измерений, как вариация, гистерезис, повторяемость, стабильность и дрейф. Известные значения перечисленных характеристик относят к случайной погрешности и суммируют с установленной погрешностью средства измерений.

Если при однократной поверке средства измерений установлено, что хотя бы в одной точке проверяемого диапазона погрешность превышает $1/3$ предела допускаемой основной погрешности (но не превышает последнюю), то допускают определять случайную и систематическую составляющие погрешности с вероятностью 0,95 как $1/2$ среднего арифметического значения погрешностей во всех проверяемых точках. Причем систематическая погрешность должна быть учтена в результате определения измеряемого параметра, если она превышает 0,1 %. Если

эта погрешность не превышает 0,1 %, то ее относят к неисключенной систематической погрешности.

2.3.3. Особенности определения погрешности измерения расхода методом переменного перепада давления

Измерения расхода и количества среды проводят методом косвенных измерений, зависящим от множества различных непосредственно измеряемых параметров. Поэтому погрешность измерений расхода и количества также зависит от погрешностей измерений различных параметров.

При суммировании погрешностей предварительно устанавливают влияние каждого измеряемого параметра на окончательный результат измерений. Это влияние оценивают коэффициентом влияния. Изменение в процентах результата измерений, вызванное изменением параметра на 1 %, называют «коэффициентом влияния». Если параметры f и y имеют математическую взаимосвязь, то коэффициент влияния вычисляют по формуле

$$v_y = \frac{\partial f}{\partial y} \frac{y}{f}. \quad (2.36)$$

Если нет математической взаимосвязи или дифференцирование затруднено, для оценки v_y применяют конечные приращения:

$$v_y = \frac{\Delta f}{\Delta y} \frac{y}{f}, \quad (2.37)$$

где Δy – приращение параметра y , Δf – приращение параметра f , соответствующее приращению параметра y .

Для определения приращений рассчитывают значение f , используя y , а для получения $f + \Delta f$ используют $y + \Delta y$. Значение Δy рекомендуется выбирать не более абсолютной погрешности параметра.

Если для измерений параметра применяют последовательно соединенные преобразователи, у которых входной величиной каждого последующего преобразователя служит выходная величина предыдущего, случайную и систематическую составляющие погрешности измерений этого параметра определяют по формулам:

$$\tilde{\delta}_y = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[(v_i)^{-1} \tilde{\delta}_{y_i} \right]^2 \right\}^{0,5}; \quad (2.38)$$

$$\bar{\delta}_y = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[(v_i)^{-1} \bar{\delta}_{y_i} \right]^2 \right\}^{0,5}, \quad (2.39)$$

где $v_i = \frac{\partial y_i}{\partial y} \frac{y}{y_i}$ – коэффициент чувствительности i -го преобразователя; y – значение входного измеряемого параметра; y_i – значение выходного параметра i -го преобразователя; $\tilde{\delta}_{y_i}$ – относительная случайная погрешность i -го преобразователя с

учетом погрешностей дрейфа, вариации, повторяемости, стабильности и дополнительно для цифровых приборов – погрешности квантования; $\bar{\delta}_{y_i}$ – относительная систематическая погрешность i -го преобразователя, рассчитанная с учетом дополнительных погрешностей нелинейности, которые определяют по техническим условиям на приборы данного типа или оценивают по результатам поверки приборов в условиях, соответствующих условиям эксплуатации; n – число преобразователей комплекса.

2.3.4. Общий подход к расчету погрешности определения расхода

Относительную погрешность измерений расхода δ_q рассчитывают по формуле

$$\delta_q = \left\{ \tilde{\delta}_q^2 + \bar{\delta}_q^2 \right\}^{1/2}, \quad (2.40)$$

где $\tilde{\delta}_q, \bar{\delta}_q$ – случайная и неисключенная систематическая составляющие погрешности измерений расхода соответственно.

Случайную составляющую погрешности измерений расхода в общем случае при раздельных измерениях параметров рассчитывают по формуле

$$\tilde{\delta}_q = \left\{ \sum_{i=1}^n \left(v_{y_i} \right)^2 \left(\tilde{\delta}_{y_i} \right)^2 \right\}^{0,5}, \quad (2.41)$$

где $\tilde{\delta}_{y_i}, v_{y_i}$ – случайные составляющие погрешности измерений параметров y_i из списка независимых источников погрешности измерений расхода и их коэффициенты влияния.

К случайным независимым источникам относят в общем случае перепад давления на СУ, абсолютное давление и температуру среды и, в зависимости от применяемых методов и средств определения теплофизических свойств среды, – плотность при рабочих условиях, плотность при стандартных условиях и компонентный состав среды.

Например, при измерениях расхода воды, плотность и вязкость которой рассчитывают по измеренным значениям давления и температуры, в формулу (2.41) включают случайные составляющие погрешности перепада давления, абсолютного давления и температуры потока.

При автоматическом и полуавтоматическом измерениях расхода случайную составляющую погрешности вычислительного устройства рекомендуется определять совместно с преобразователями.

Неисключенную систематическую составляющую погрешности измерений расхода в общем случае при раздельных измерениях параметров рассчитывают по формуле

$$\bar{\delta}_q = \left\{ \sum_{i=1}^n \left(v_{y_i} \right)^2 \left(\bar{\delta}_{y_i} \right)^2 + \bar{\delta}_{y_i}^2 \right\}^{0,5}, \quad (2.42)$$

где $\bar{\delta}_{y_i}, v_{y_i}$ – неисключенные составляющие погрешности измерений параметров y_i из списка независимых источников погрешности измерений расхода, методические погрешности используемых зависимостей для расчета свойств среды и характеристик СУ и их коэффициенты влияния; $\bar{\delta}_{y_i}$ – составляющие погрешности, обусловленные тем, что часть параметров может быть принята условно-постоянными.

При автоматическом и полуавтоматическом измерениях расхода неисключенную систематическую составляющую погрешности определяют по формуле (2.42) при условии замены погрешности контролируемых параметров, значения которых автоматически учитываются вычислительным комплексом, на систематическую погрешность этого комплекса. При этом все методические погрешности ($\bar{\delta}_C, \bar{\delta}_{\varepsilon_0}$ и т. д.) суммируют с систематической погрешностью комплекса.

Значения коэффициентов влияния v_y , входящих в формулы (2.41) и (2.42), в большинстве случаев вычисляют с учетом принятых для практических расчетов допущений:

- погрешности определения $C, \varepsilon, \Delta p, \rho$ не зависят друг от друга;
- погрешность определения C , обусловленная погрешностью расчета или измерений вязкости среды, является пренебрежимо малой величиной;
- погрешность определения температурных коэффициентов линейного расширения СУ и ИТ является малой величиной;
- погрешность расчета ε , обусловленная погрешностью расчета β , является малой величиной;
- погрешности определения коэффициента сжимаемости среды и ρ_c не зависят друг от друга.

При этих допущениях в формулы расчета погрешности расхода и количества вводят только погрешности C, ε (для газов), $\Delta p, \rho, D, d$ и дополнительно ρ_c , если этот параметр используют в расчетах.

Значения коэффициентов влияния, вычисленных при принятых допущениях, представлены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Значения коэффициентов влияния

Контролируемая среда	Изменяемые параметры	v_C	v_D	v_d	$v_{\Delta p}$	v_ε	v_ρ	v_{ρ_c}	Примечание
Жидкость	q_m, q_o	1,0	$\frac{2\beta^4}{1-\beta^4}$	$\frac{2}{1-\beta^4}$	0,5	0,0	0,5	0,0	–
Газ	q_m	1,0	$\frac{2\beta^4}{1-\beta^4}$	$\frac{2}{1-\beta^4}$	0,5	1,0	0,5	0,0	–

Контролируемая среда	Измеряемые параметры	ν_C	ν_D	ν_d	$\nu_{\Delta p}$	ν_ε	ν_ρ	ν_{ρ_c}	Примечание
Газ	q_c	1,0	$\frac{2\beta^4}{1-\beta^4}$	$\frac{2}{1-\beta^4}$	0,5	1,0	0,5	1,0	ρ и ρ_c независимы
		1,0	$\frac{2\beta^4}{1-\beta^4}$	$\frac{2}{1-\beta^4}$	0,5	1,0	0,5	0,5	ρ определена через ρ_c через K, p и T

С учетом значений, приведенных в табл. 2.6, формулы (2.41) и (2.42) примут вид:

- при измерениях объемного или массового расхода жидкости:

$$\bar{\delta}_q = \left\{ \bar{\delta}_C^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right)^2 \bar{\delta}_D^2 + \left(\frac{2}{1-\beta^4} \right)^2 \bar{\delta}_d^2 + 0,25(\bar{\delta}_{\Delta p}^2 + \delta_\rho^2) \right\}^{0,5}; \quad (2.43)$$

$$\tilde{\delta}_q = 0,5(\tilde{\delta}_{\Delta p}^2 + \tilde{\delta}_\rho^2)^{0,5}; \quad (2.44)$$

- при измерениях массового расхода газа:

$$\bar{\delta}_q = \left\{ \bar{\delta}_C^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right)^2 \bar{\delta}_D^2 + \left(\frac{2}{1-\beta^4} \right)^2 \bar{\delta}_d^2 + \bar{\delta}_\varepsilon^2 + 0,25(\bar{\delta}_{\Delta p}^2 + \delta_\rho^2) \right\}^{0,5}; \quad (2.45)$$

$$\tilde{\delta}_q = \left[\tilde{\delta}_\varepsilon^2 + 0,25(\tilde{\delta}_{\Delta p}^2 + \tilde{\delta}_\rho^2) \right]^{0,5}; \quad (2.46)$$

- при измерениях объемного расхода газа, приведенного к стандартным условиям, и случае независимости ρ и ρ_c (например, ρ определяют с помощью плотногомера):

$$\bar{\delta}_q = \left\{ \bar{\delta}_C^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right)^2 \bar{\delta}_D^2 + \left(\frac{2}{1-\beta^4} \right)^2 \bar{\delta}_d^2 + \bar{\delta}_\varepsilon^2 + 0,25(\bar{\delta}_{\Delta p}^2 + \delta_\rho^2) + \bar{\delta}_{\rho_c}^2 \right\}^{0,5}; \quad (2.47)$$

$$\tilde{\delta}_q = \left[\tilde{\delta}_\varepsilon^2 + 0,25(\tilde{\delta}_{\Delta p}^2 + \tilde{\delta}_\rho^2) + \tilde{\delta}_{\rho_c}^2 \right]^{0,5}; \quad (2.48)$$

- при измерениях объемного расхода газа, приведенного к стандартным условиям, и случае зависимости ρ и ρ_c :

$$\bar{\delta}_q = \left\{ \bar{\delta}_C^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right)^2 \bar{\delta}_D^2 + \left(\frac{2}{1-\beta^4} \right)^2 \bar{\delta}_d^2 + \bar{\delta}_\varepsilon^2 + 0,25(\bar{\delta}_{\Delta p}^2 + \delta_\rho^2 + \bar{\delta}_{\rho_c}^2) \right\}^{0,5}; \quad (2.49)$$

$$\tilde{\delta}_q = \left[\tilde{\delta}_\varepsilon^2 + 0,25 \left(\tilde{\delta}_{\Delta p}^2 + \tilde{\delta}_p^2 + \tilde{\delta}_{\rho_c}^2 \right) \right]^{0,5}. \quad (2.50)$$

При наличии условно-постоянных параметров в формулах (2.43), (2.45), (2.47), и (2.49) в соответствии с формулой (2.42) учитывают дополнительную погрешность.

2.3.5. Составляющие погрешности

Погрешность коэффициента истечения СУ – неисключенную методическую систематическую погрешность определяют по формуле

$$\bar{\delta}_C = \left[\left(\bar{\delta}_{C_0} + \bar{\delta}_L + \bar{\delta}_E + \bar{\delta}_h + \bar{\delta}_{e_x} \right)^2 + \bar{\delta}_{\text{ш}}^2 + \bar{\delta}_{\text{к}}^2 \right]^{0,5}, \quad (2.51)$$

где $\bar{\delta}_L$ – составляющая погрешности, обусловленная недостаточной длиной прямолинейного участка трубопровода перед СУ, равная (кроме труб Вентури)*

$$\bar{\delta}_L = \left[0,8 + 19,2 \left(L_1 / L_{k1} \right)^4 \right]^{-1}; \quad (2.52)$$

$\bar{\delta}_h$ – погрешность, обусловленная наличием уступа высотой более 3% на составном ИТ на участке длиной L_{k1} перед диафрагмой, равная $\bar{\delta}_h = \pm 0,2\%$;

$\bar{\delta}_{e_x}$ – погрешность, обусловленная смещением e_x оси диафрагмы относительно оси ИТ, определяемая из условия**

$$\text{при } \frac{0,0025D}{0,1 + 2,3\beta^4} < e_x < \frac{0,005D}{0,1 + 2,3\beta^4} \quad \bar{\delta}_{e_x} = \pm 0,3\%; \quad (2.53)$$

$\bar{\delta}_E$ – погрешность, обусловленная деформацией диафрагмы из-за недостаточной ее толщины:

$$\text{при } E_D < E_D^{\min} \quad \bar{\delta}_E = \frac{\Delta p_B}{E_y} \frac{D^2}{E_D^2} \left(a \frac{D}{E_D} - b \right), \quad (2.54)$$

где E_y – модуль упругости материала диафрагмы, Па; Δp_B – верхний предел перепада давления на диафрагме;

$$a = \beta(13,5 - 15,5\beta); \quad b = 117 - 106\beta^{1,9}; \quad (2.55)$$

E_D^{\min} – минимальная толщина диафрагмы, определяемая по условиям отсутствия ее деформации:

$$E_D^{\min} = D \left[\frac{\Delta p_B}{\sigma_m} (0,681 - 0,651\beta) \right]^{0,5}, \quad (2.56)$$

* Сокращенная длина прямых участков при применении труб Вентури для местных сопротивлений, приведенных в табл. 1.2, не должна быть менее длин, приведенных в верхних строках этой таблицы. При этом независимо от сокращенной длины прямого участка дополнительную погрешность принимают равной 0,5 %.

** Несоосность большая, чем определенная формулой (2.53), не допускается.

где σ_m – предел текучести материала диафрагмы при рабочей температуре;

$\bar{\delta}_{\text{ш}}$ – погрешность, обусловленная недостоверными данными о степени шероховатости трубопровода,

$$\bar{\delta}_{\text{ш}} = (K_{\text{ш}} - 1) \cdot 100; \quad (2.57)$$

$\bar{\delta}_{\text{к}}$ – погрешность, обусловленная недостоверными данными о начальном радиусе закругления входной кромки диафрагмы, определяемая по формуле

$$\bar{\delta}_{\text{к}} = (K_{\text{п}} - 1) \cdot 100; \quad (2.58)$$

$\bar{\delta}_{C_0}$ – для стандартных диафрагм определяется из условий:

$$\text{при } \beta \leq 0,6 \quad \bar{\delta}_{C_0} = 0,6; \quad (2.59)$$

$$\text{при } \beta \geq 0,6 \quad \bar{\delta}_{C_0} = \beta. \quad (2.60)$$

Для стандартных сопел ИСА $\bar{\delta}_{C_0}$ находится из условий

$$\delta_{C_0} = \pm 0,8\% \text{ при } \beta \leq 0,6; \quad (2.61)$$

$$\delta_{C_0} = \pm (2\beta - 0,4)\% \text{ при } \beta > 0,6. \quad (2.62)$$

Для стандартных труб Вентури погрешность $\bar{\delta}_{C_0}$ находится по формуле

$$\delta_{C_0} = 2,7 - Re/10^5. \quad (2.63)$$

Для стандартных сопел Вентури погрешность $\bar{\delta}_{C_0}$ находится с использованием формулы

$$\delta_{C_0} = \pm (1,2 + 1,5\beta^4). \quad (2.64)$$

Погрешности измерений d и D являются неисключенными систематическими погрешностями.

Значение $\bar{\delta}_d$ принимают равным 0,07 %, а $\bar{\delta}_D$ – равным 0,4 %.

Погрешность определения ε имеет систематическую составляющую, которую рассчитывают по формуле

$$\bar{\delta}_{\varepsilon} = \left[\bar{\delta}_{\varepsilon_0}^2 + \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \right)^2 \bar{\delta}_{\text{к}}^2 \right]^{0,5}. \quad (2.65)$$

Случайной составляющей $\tilde{\delta}_{\varepsilon} = \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \right) \tilde{\delta}_{\text{к}}$ можно пренебречь. Значения методической составляющей погрешности $\bar{\delta}_{\varepsilon_0}$ представлены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Значения составляющей погрешности $\bar{\delta}_{\varepsilon_0}$

Сужающее устройство	Относительная погрешность
Диафрагмы при $\beta < 0,75$	$4\Delta p/p$
Диафрагмы (угловой отбор Δp) при $\beta > 0,75$	$8\Delta p/p$
Стандартное сопло ИСА	$2\Delta p/p$

Сужающее устройство	Относительная погрешность
Стандартные трубы Вентури	$(4 + 100\beta^8) \frac{\Delta p}{p}, \%$
Стандартное сопло Вентури	$(4 + 100\beta^8) \Delta p / p$

Погрешность δ_ε для жидкостей равна нулю.

Систематическую и случайную составляющие погрешности измерений перепада давления в соответствии с (2.38), (2.39) вычисляют по формулам:

$$\tilde{\delta}_{\Delta p} = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[v_i^{-1} \tilde{\delta}_{y_i} \right]^2 \right\}^{0,5}; \quad (2.66)$$

$$\bar{\delta}_{\Delta p} = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[v_i^{-1} \bar{\delta}_{y_i} \right]^2 \right\}^{0,5}. \quad (2.67)$$

Значения коэффициентов чувствительности, входящих в формулы (2.66) и (2.67), для ряда случаев приведены в табл. 2.8.

Таблица 2.8

Значения коэффициентов чувствительности для расчета составляющих погрешности перепада давления

n	Функция преобразования прибора			ϑ_1^{-1}	ϑ_2^{-1}	ϑ_3^{-1}
	1-го	2-го	3-го			
2	Линейная	Линейная	—	1	1	—
2	Линейная	Квадратичная	—	1	2	—
2	Квадратичная	Линейная	—	2	2	—
3	Линейная	Линейная	Линейная	1	1	1
3	Линейная	Линейная	Квадратичная	1	1	2
3	Линейная	Квадратичная	Линейная	1	2	2
3	Квадратичная	Линейная	Линейная	2	2	2

В соответствии с табл. 2.8, например, для случая комплекта, состоящего из преобразователя разности давлений, регистрирующего прибора с линейными функциями преобразования и корневого планиметра, формула (2.66) примет вид

$$\tilde{\delta}_{\Delta p} = \left[\tilde{\delta}_1^2 + \tilde{\delta}_2^2 + 4\tilde{\delta}_n^2 \right]^{0,5}, \quad (2.68)$$

где $\tilde{\delta}_1^2, \tilde{\delta}_2^2, \tilde{\delta}_n^2$ — случайные составляющие погрешности первого, второго преобразователи и планиметра соответственно.

Составляющие погрешности измерений плотности при рабочих условиях вычисляют следующим образом:

- если плотность измеряют плотномером, то $\bar{\delta}_\rho$ и $\tilde{\delta}_\rho$ определяют по паспортным данным или протоколу поверки;
- если плотность рассчитывают косвенным методом, то в общем случае

$$\bar{\delta}_p = \left[\bar{\delta}_{\rho_0}^2 + v_{\rho_c}^2 \bar{\delta}_{\rho_c}^2 + v_T^2 \bar{\delta}_T^2 + v_p^2 \bar{\delta}_p^2 + \sum_i v_{x_i}^2 \bar{\delta}_{x_i}^2 \right]^{0,5}; \quad (2.69)$$

$$\tilde{\delta}_p = \left[\tilde{\delta}_{\rho_0}^2 + v_{\rho_c}^2 \tilde{\delta}_{\rho_c}^2 + v_T^2 \tilde{\delta}_T^2 + v_p^2 \tilde{\delta}_p^2 + \sum_i v_{x_i}^2 \tilde{\delta}_{x_i}^2 \right]^{0,5}, \quad (2.70)$$

где $\tilde{\delta}_{\rho_0}$ – методическая погрешность расчета плотности (значение приводят в соответствующих нормативных документах, устанавливающих методы косвенного расчета плотности); при расчете плотности через коэффициент сжимаемости K следует заменить $\tilde{\delta}_{\rho_0}$ на методическую погрешность определения коэффициента сжимаемости, а составляющие $\tilde{\delta}_{x_i}$ и $\bar{\delta}_{x_i}$ учитывают при расчете составляющих погрешностей определения K и ρ_c ; $\tilde{\delta}_{x_i}$, $\bar{\delta}_{x_i}$ – составляющие погрешности определения компонентного состава среды (для однокомпонентной среды их принимают равными нулю); $v_{\rho_c}, v_T, v_p, v_{x_i}$ – коэффициенты влияния, определяемые в соответствии с (2.36), (2.37) (для газов допускается значения v_{ρ_c}, v_T, v_p принимать равными единице, для жидкостей v_p – равным нулю);

- если измеряют объемный расход при стандартных условиях и плотность ρ зависит от ρ_c , то расчет погрешностей $\tilde{\delta}_p$ и $\bar{\delta}_p$ выполняют без учета погрешностей $\tilde{\delta}_{\rho_c}$ и $\bar{\delta}_{\rho_c}$, так как погрешность измерения расхода, вызванная погрешностью измерений ρ_c , учтена в формулах (2.49) и (2.50) членом $0,25\delta_{\rho_c}$.

Погрешности измерений плотности газа при стандартных условиях определяют следующим образом:

- если ρ_c измеряют плотномером, то $\tilde{\delta}_{\rho_c}$ и $\bar{\delta}_{\rho_c}$ определяют по его паспортным данным или (и) данным протокола поверки;
- если ρ_c рассчитывают методом косвенных измерений, то δ_{ρ_c} принимают равной погрешности расчета по используемому уравнению (значение приводят в соответствующих нормативных документах, устанавливающих методы косвенного расчета плотности, например [3]) с учетом погрешностей, связанных с определением исходных данных.

Погрешности измерений абсолютного давления определяют по формулам:

$$\tilde{\delta}_p = \left[\left(\frac{p_u}{p} \right)^2 \sum_{i=1}^n \tilde{\delta}_{p_{u_i}}^2 + \left(\frac{p_6}{p} \right)^2 \tilde{\delta}_{p_6}^2 \right]^{0,5}; \quad (2.71)$$

$$\bar{\delta}_p = \left[\left(\frac{p_u}{p} \right)^2 \sum_{i=1}^n \bar{\delta}_{p_{u_i}}^2 + \left(\frac{p_6}{p} \right)^2 \bar{\delta}_{p_6}^2 \right]^{0,5}, \quad (2.72)$$

где $\tilde{\delta}_{p_{иi}}$ и $\bar{\delta}_{p_{иi}}$ – случайная и систематическая составляющие погрешности i -го преобразователя или прибора, входящего в комплект для измерений избыточного давления; $\tilde{\delta}_{p_б}$ и $\bar{\delta}_{p_б}$ – погрешности измерений барометрического давления.

Составляющие погрешности определения температуры среды рассчитывают по формулам:

$$\tilde{\delta}_T = \frac{100(t_B - t_H)}{273,15 + t} \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta \tilde{y}_i}{y_{B_i} - y_{H_i}} \right)^2 \right]^{0,5}, \%, \quad (2.73)$$

$$\bar{\delta}_T = \frac{100(t_B - t_H)}{273,15 + t} \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta \bar{y}_i}{y_{B_i} - y_{H_i}} \right)^2 \right]^{0,5}, \%, \quad (2.74)$$

где t_B, t_H – верхнее и нижнее значения диапазона шкалы средства измерений температуры; $\Delta \tilde{y}_i, \Delta \bar{y}_i$ – случайная и систематическая составляющие абсолютной погрешности i -го преобразователя или прибора, входящего в комплект; y_{B_i}, y_{H_i} – верхнее и нижнее значения диапазона шкалы или выходного сигнала i -го преобразователя или прибора, входящего в комплект.

Рассмотрим пример. Пусть комплект средств измерений температуры включает в себя термопреобразователь типа ТСМ 100М, нормирующий преобразователь Ш-71, самопишущий прибор с токовым входным сигналом и полярный планиметр.

Верхнее и нижнее значения диапазона измеряемых температур:

$$t_B = 50 \text{ } ^\circ\text{C}, t_H = -50 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Диапазон выходного сигнала термопреобразователя и составляющие абсолютной погрешности:

$$y_{B_1} - y_{H_1} = 124,1 - 78,48 = 42,92 \text{ Ом};$$

$$\bar{y}_1 = 0,05 \text{ Ом}, \quad \tilde{y}_1 = 0,2 \text{ Ом}.$$

Диапазон выходного сигнала нормирующего преобразователя:

$$y_{B_2} - y_{H_2} = 5 - 0,0 = 5,0 \text{ мА}.$$

Поверкой установлено, что систематическая погрешность нормирующего преобразователя равна нулю, поэтому

$$\Delta \tilde{y}_2 = S_2 / 100 \cdot A_2 = 0,1 / 100 \cdot 5 = 0,005 \text{ мА};$$

$$\Delta \bar{y}_2 = 0,$$

где S_2, A_2 — класс точности нормирующего преобразователя и его нормирующее значение, равное значению верхнего предела измерений.

Диапазон шкалы показывающего самопишущего прибора и составляющие абсолютной погрешности (в соответствии с рекомендациями раздела 2.3.2):

$$y_{B_3} - y_{H_3} = 5 - 0,0 = 5,0 \text{ мА};$$

$$\Delta y_3 = S_3 / 100 \cdot A_3 = 0,25 / 100 \cdot 5 = 0,005 \text{ мА};$$

$$\Delta \tilde{y}_3 = 0,0015 \text{ мА};$$

$$\Delta \bar{y}_3 = 0,002 \text{ мА},$$

где S_3, A_3 — класс точности самопишущего прибора и его нормирующее значение, равное значению верхнего предела измерений.

Диапазон показаний полярного планиметра при записи в течение $\tau = 8$ ч, скорости протяжки ленты $u_{\text{л}} = 2$ см/ч и ширине диаграммной ленты $l_{\text{ш}} = 25$ см:

$$y_{\text{в4}} - y_{\text{н4}} = 8 \cdot 2 \cdot 25 = 25,0 \text{ см}^2.$$

Приведенная к номинальному значению результата планиметрирования погрешность $S_4 = 0,25$ %.

В результате обработки диаграммной ленты получено планиметрическое число $N_{\text{л}}$, равное $300,5 \text{ см}^2$. Составляющие абсолютной погрешности для полученного значения:

$$\Delta \bar{y}_4 = S_4 / 100 \cdot N_{\text{л}} = 0,25 / 100 \cdot 300,5 = 0,75 \text{ см}^2;$$

$$\Delta \tilde{y}_4 = 0. \text{ (См. ниже рекомендации по определению } \delta_{\text{п}} \text{).}$$

Значение измеренной температуры:

$$\bar{t} = t_{\text{н}} + (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) N_{\text{л}} / (u_{\text{л}} \tau l_{\text{ш}}) = -50 + [50 - (-50)] 300,5 / (2 \cdot 8 \cdot 25) = 25,1^\circ \text{С}.$$

Составляющие погрешности измерений средней температуры с учетом установленных характеристик в соответствии с формулами (2.70) и (2.71) имеют значения:

$$\tilde{\delta}_T = \frac{100[50 - (-50)]}{273,15 + 25,1} \left[\left(\frac{0,2}{42,92} \right)^2 + \left(\frac{0,005}{5} \right)^2 + \left(\frac{0,0015}{5} \right)^2 \right]^2 = 0,16 \%;$$

$$\bar{\delta}_T = \frac{100[50 - (-50)]}{273,15 + 25,1} \left[\left(\frac{0,05}{42,92} \right)^2 + \left(\frac{0,002}{5} \right)^2 + \left(\frac{0,75}{400} \right)^2 \right]^2 = 0,08 \%.$$

Погрешность планиметрирования не содержит случайную погрешность ($\tilde{\delta}_{\text{п}} = 0$), а систематическая погрешность $\bar{\delta}_{\text{п}} = \delta_{\text{п}}$.

Погрешность определения интервала времени τ определяется следующим образом:

- при планиметрировании диаграмм

$$\delta_{\tau} = 100 \Delta_{\text{х.д}} / \tau, \quad (2.75)$$

где $\Delta_{\text{х.д}}$ — абсолютная погрешность хода приводного механизма диаграммы;

- при автоматическом вычислении количества

$$\delta_{\tau} = \frac{n \Delta \tau - \tau_{\phi}}{\tau_{\phi}}, \quad (2.76)$$

где τ_{ϕ} — интервал времени, определенный с помощью образцового средства измерений, соответствующий интервалу, в котором производится n циклов вычислений. Погрешность δ_{τ} — систематическая.

Составляющие погрешности параметра, принятого за условно-постоянную величину, оценивают по формулам:

$$\tilde{\delta}_y = \frac{y_B - y_H}{y_B + y_H} 100; \quad (2.77)$$

$$\bar{\delta}_y = 0. \quad (2.78)$$

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНТРОЛИРУЕМОЙ СРЕДЫ

3.1. Вязкость среды

Значения коэффициента динамической вязкости μ воды и водяного пара в зависимости от температуры и давления приведены в табл. П.1–П.3.

Значения коэффициента динамической вязкости μ некоторых технических газов приведены в табл. П.4.

Если вязкость жидкого топлива определена по методу Энглера в условных единицах, то в этом случае перевод условной вязкости в динамическую, Па·с, или кинематическую, м/с, можно осуществить по формулам:

$$\mu = \rho(0,0073\text{ВУ}_t - 0,0063/\text{ВУ}_t); \quad (3.1)$$

$$\nu = 0,073\text{ВУ}_t - 0,0063/\text{ВУ}_t, \quad (3.2)$$

где ρ – плотность измеряемого вещества, кг/м³; ВУ_t – условная вязкость при температуре t в градусах Энглера.

Коэффициент динамической вязкости связан с коэффициентом кинематической вязкости соотношением $\mu = \nu\rho$.

Коэффициент кинематической вязкости ν_{20} , м²/с, при стандартных условиях* газовых смесей, образующихся в топках и газоходах, может быть приближенно определен по формуле

$$\nu_{20} = \frac{15,4 \cdot 10^{-4}}{100 + (\text{CO}_2 + \text{C}_n\text{H}_m) - 0,857\text{H}_2}, \quad (3.3)$$

где CO_2 , C_nH_m , H_2 – объемное содержание в газовой смеси соответственно диоксида углерода, тяжелых углеводородов (кроме метана) и водорода, %. Для указанных газовых смесей коэффициент кинематической вязкости при любой температуре t в интервале $-10 \dots 40$ °С и давлении 1,0332 кгс/см² может быть подсчитан по формуле

$$\nu_t = \nu_0[1 + 0,006(t - 20)]. \quad (3.4)$$

Если известен состав газовой смеси, ее коэффициент динамической вязкости может быть также подсчитан по формуле Манна

* В промышленных измерениях за стандартное состояние газа принимается состояние при 20 °С (293,15 К) и давлении 760 мм рт. ст. (101,3 кПа). Поэтому в дальнейшем под нормальным состоянием подразумевается именно это состояние.

$$\frac{1}{\mu} = \sum \frac{\eta_i}{\mu_i}, \quad (3.5)$$

где η_i , μ_i – соответственно массовая доля и коэффициент динамической вязкости отдельных компонентов газовой смеси.

Объемные доли компонент газовой смеси γ_i пересчитываются в массовые доли η_i по формуле

$$\eta_i = \gamma_i \frac{\rho_i}{\rho}. \quad (3.6)$$

Если известен коэффициент динамической вязкости компонентов газовой смеси μ_0 при температуре 0 °С, то пересчет его на температуру t может быть проведен с использованием формулы

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{t + 273,15}{273,15} \right)^{1,5} \frac{273,15 + C}{t + 273,15 + C}, \quad (3.7)$$

где C – коэффициент, значения которого для некоторых газов приведены в табл. П.4.

3.2. Показатель адиабаты

Значения показателя адиабаты для некоторых газов приведены в табл. П.4. Показатель адиабаты вещества k может быть принят равным:

- для перегретого водяного пара $k = 1,3$;
- для воздуха и двухатомных газов $k = 1,4$;
- для одноатомных газов $k = 1,67$;
- для коксовых газов, газов, получаемых при сухой перегонке каменного угля $k = 1,37$.

Если отсутствуют экспериментальные данные, то показатель адиабаты для смеси газов может быть определен по формуле

$$k = \sum \gamma_i k_i, \quad (3.8)$$

где k_i – показатель адиабаты i -го компонента газовой смеси.

3.3. Плотность среды

Для определения плотности жидкости в рабочем состоянии можно воспользоваться формулой

$$\rho = \rho_0 [1 + \beta(20 - t)], \quad (3.9)$$

где ρ_0 – плотность жидкости при температуре 20 °С; β – коэффициент расширения жидкости, 1/°С; t – рабочая температура жидкости перед диафрагмой.

Плотность воды в зависимости от температуры приведена в табл. П.7–П.9.

Для ряда сухих газов плотность, соответствующая различным давлениям и температуре, приведена в табл. П.4.

Плотность газовой смеси в стандартном состоянии определяется исходя из ее состава по формуле

$$\rho_c = \frac{\gamma_1 \rho_{c1} + \gamma_2 \rho_{c2} + \gamma_3 \rho_{c3} + \dots}{100}, \quad (3.10)$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – объемное содержание компонент в газовой смеси, %; $\rho_{c1}, \rho_{c2}, \rho_{c3}$ – плотность отдельных компонент в стандартных условиях.

Плотность сухого газа в рабочем состоянии может быть определена по формуле

$$\rho_d = \rho_{dc} \frac{p_1 T_c}{T p_c K}, \quad (3.11)$$

где ρ_{dc} – плотность сухого газа в стандартном состоянии, кг/м^3 ; $p_c = 101,3 \cdot 10^3$ Па – давление, соответствующее стандартному состоянию газа; p_1 – абсолютное рабочее давление (перед диафрагмой), Па; T – абсолютная рабочая температура ($t + 273,15$); $T_c = 294,15$ К – абсолютная температура, соответствующая стандартному состоянию газа; K – коэффициент сжимаемости, учитывающий отличие свойств реального газа от идеального.

Коэффициент K для газовой смеси может быть найден по формуле

$$K = \frac{\gamma_1 K_1 + \gamma_2 K_2 + \gamma_3 K_3 + \dots}{100}, \quad (3.12)$$

где K_1, K_2, K_3 – коэффициенты сжимаемости отдельных компонент, входящих в газовую смесь, берутся, например, по графикам рис. 3.1–3.8.

Плотность влажного газа в рабочем состоянии может быть определена по формулам:

$$\rho_\phi = \rho_d + \rho_\pi = \rho_d + \phi \rho_{\pi.п.}; \quad (3.13)$$

$$\rho_d = \rho_{dc} \frac{(p_1 - \phi p_{\pi.п.}) T_c}{T p_c K}. \quad (3.14)$$

В этих формулах обозначено: ρ_ϕ – плотность влажного газа в рабочем состоянии, кг/м^3 ; ρ_d – парциальная плотность сухого газа, то есть его плотность при температуре $T = t + 273,15$ и парциальном давлении сухого газа, равном $(p - \phi p_{\pi.п.})$, кг/м^3 ; ρ_π – плотность пара в газе при его парциальном давлении, равном $\phi p_{\pi.п.}$, кг/м^3 ; ρ_{dc} – плотность сухого газа в стандартном состоянии, кг/м^3 ; ϕ – относительная влажность, то есть отношение массы водяного пара, находящегося в 1 м^3 влажного газа, к максимально возможной массе при той же температуре и давлении; $\rho_{\pi.п.}$ – плотность насыщенного водяного пара, соответствующая температуре t перед диафрагмой, берется по табл. П.5; $p_{\pi.п.}$ – давление насыщенного водяного пара при температуре t , Па, берется по табл. П.6.

Газы и их смеси являются сухими, когда их относительная влажность ϕ при стандартных условиях находится в пределах $0 \leq \phi \leq 0,1$, и влажными, если значение их относительной влажности при стандартных условиях лежит в пределах $0,1 \leq \phi \leq 1,0$.

Плотность влажного водяного пара, кг/м^3 , находится по формуле

$$\rho_{\text{вл.п.}} = \frac{1}{(1-x)/\rho' + x/\rho''}, \quad (3.15)$$

где ρ' и ρ'' – плотность соответственно воды при температуре пара и сухого насыщенного пара при той же температуре, кг/м^3 ; x – степень сухости пара (по калориметру или химическому анализу насыщенного пара).

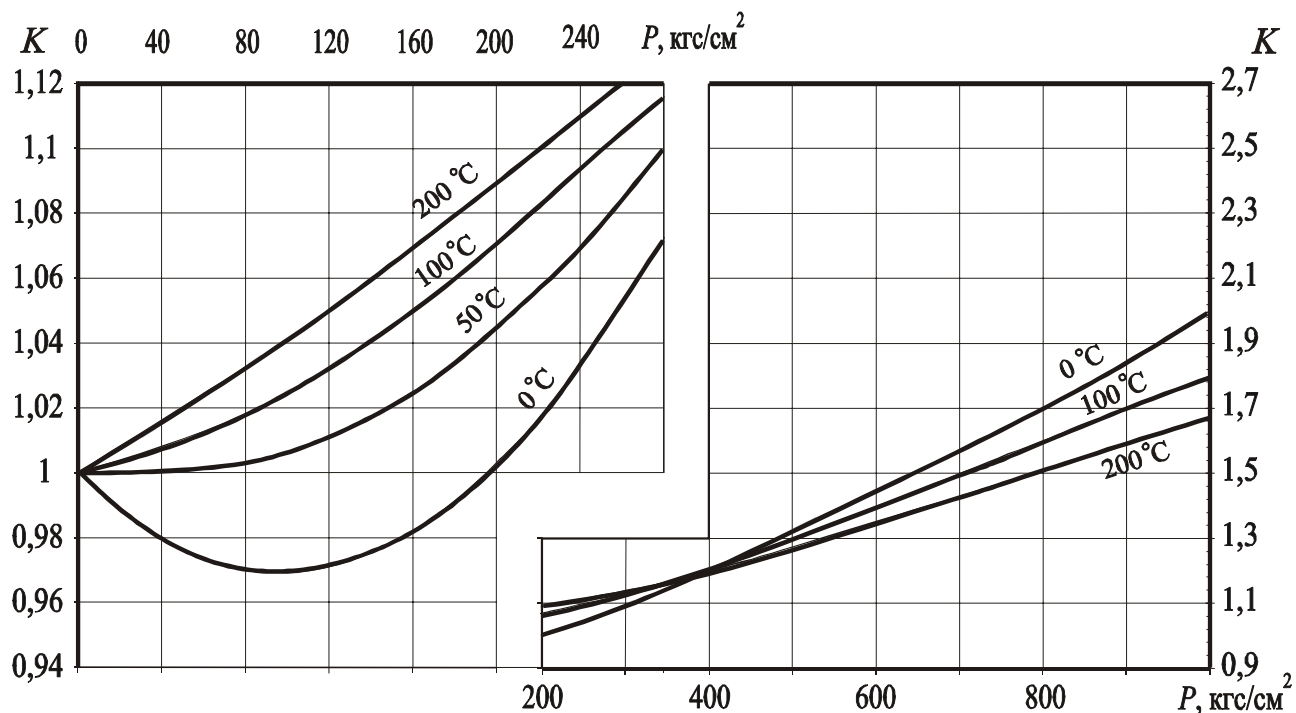


Рис. 3.1. Коэффициент сжимаемости воздуха для различных давлений и температур

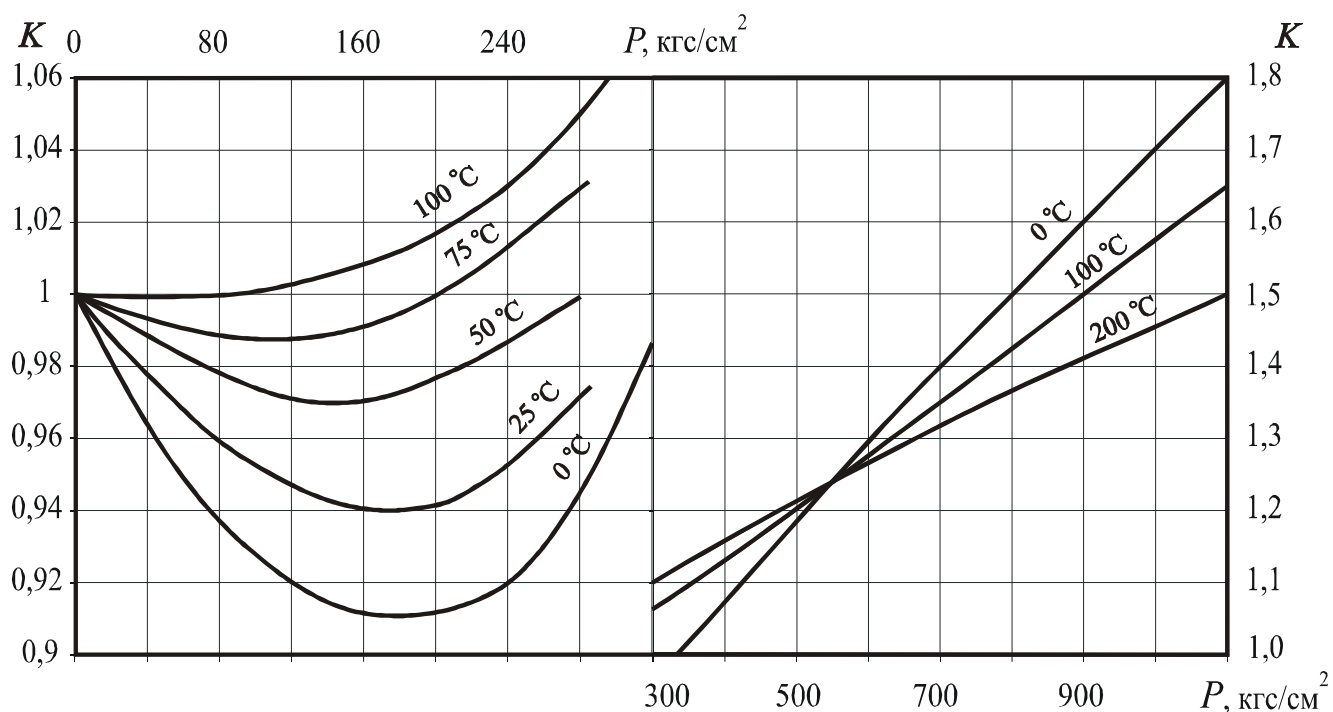


Рис. 3.2. Коэффициент сжимаемости кислорода для различных давлений и температур

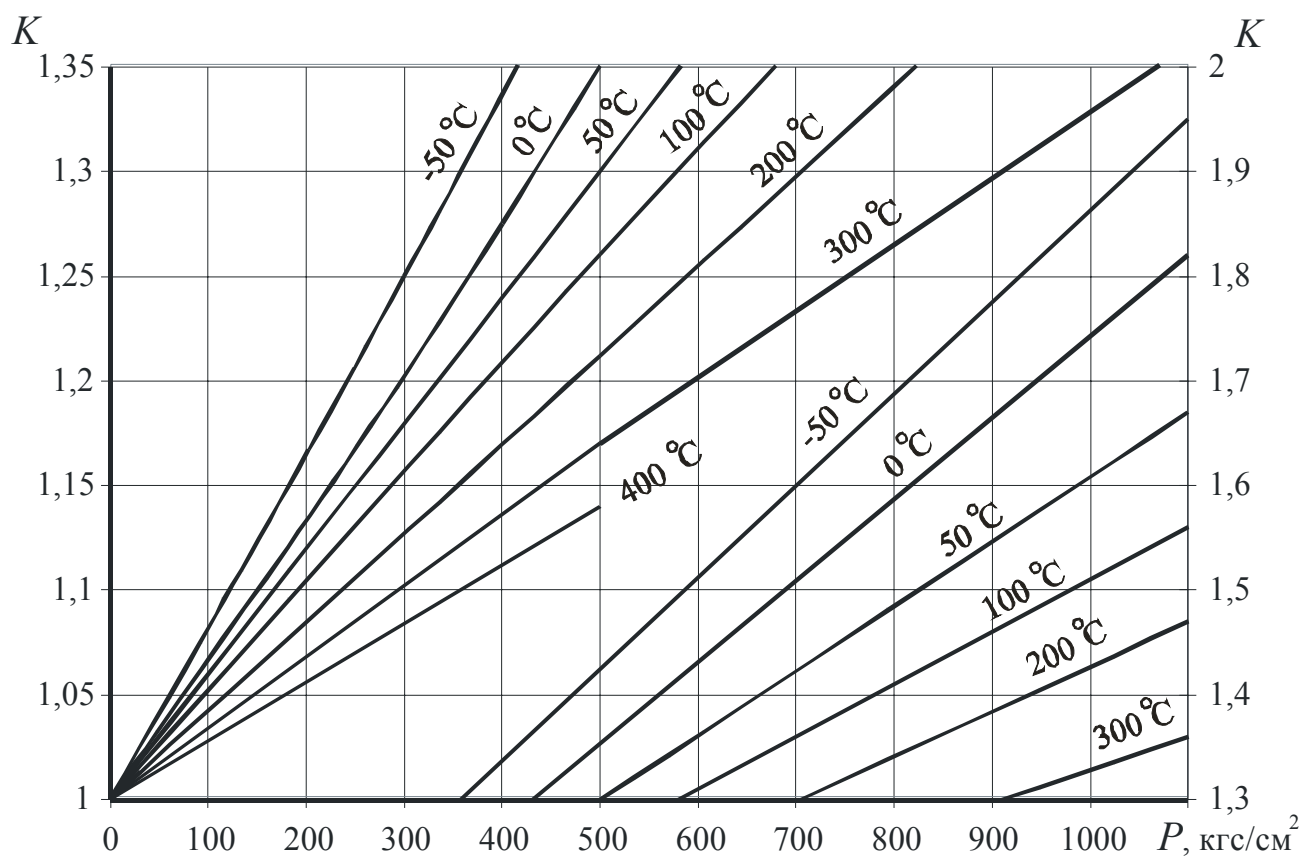


Рис. 3.3. Коэффициент сжимаемости водорода для различных давлений и температур

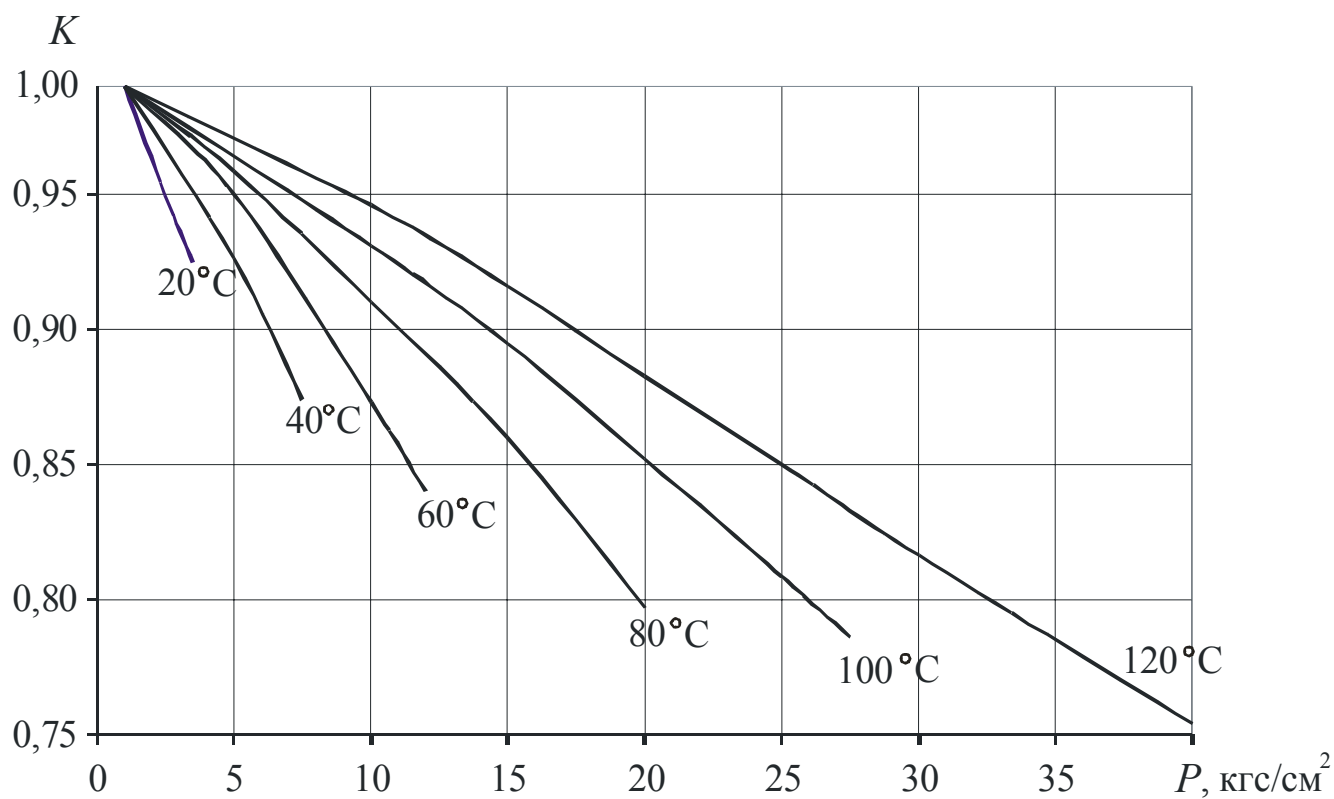


Рис. 3.4. Коэффициент сжимаемости хлора для различных давлений и температур

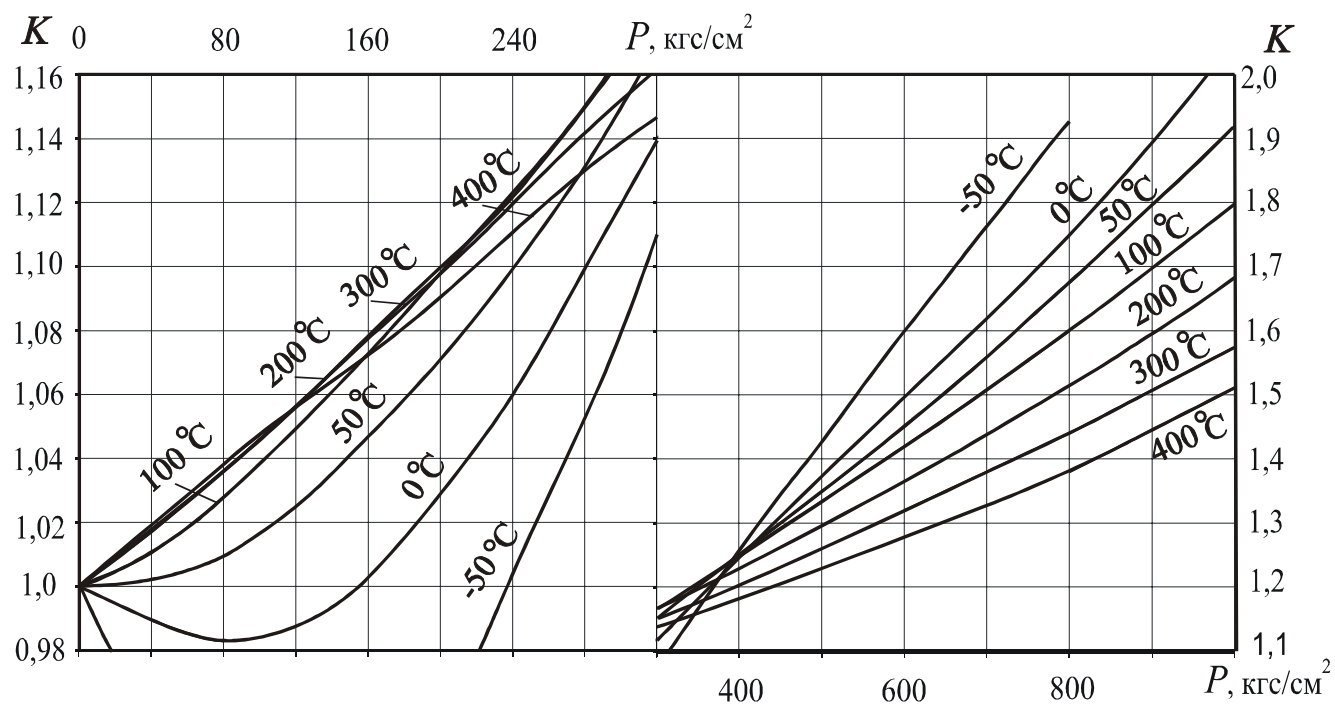


Рис. 3.5. Коэффициент сжимаемости азота для различных давлений и температур

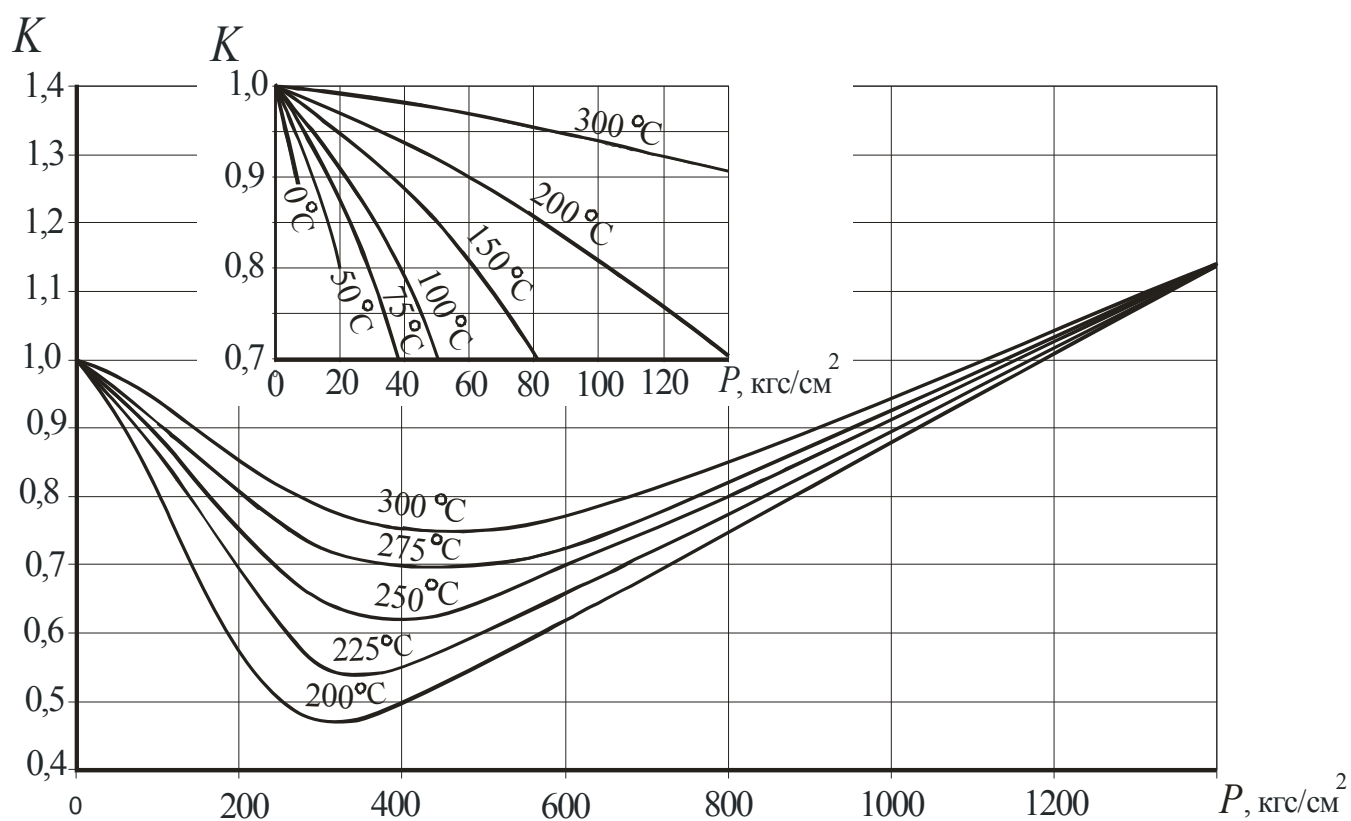


Рис. 3.6. Коэффициент сжимаемости аммиака для различных давлений и температур

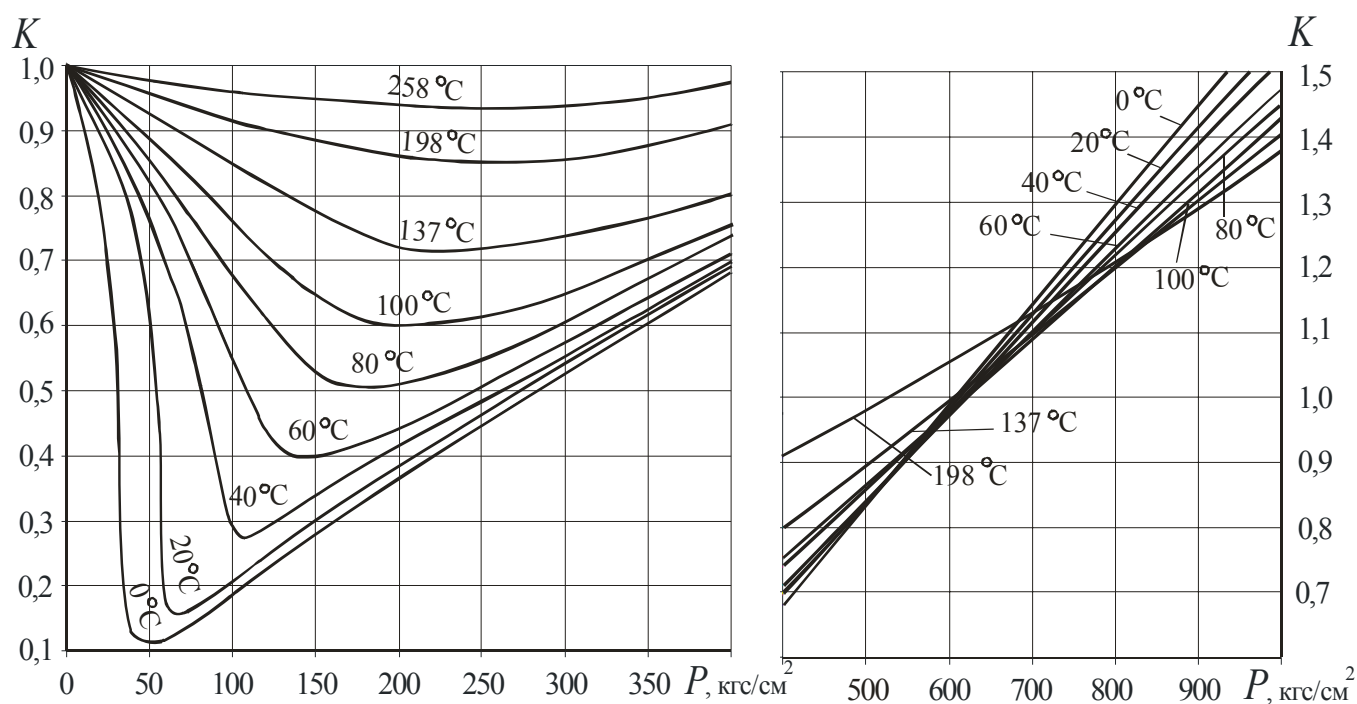


Рис. 3.7. Коэффициент сжимаемости углекислого газа для различных давлений и температур

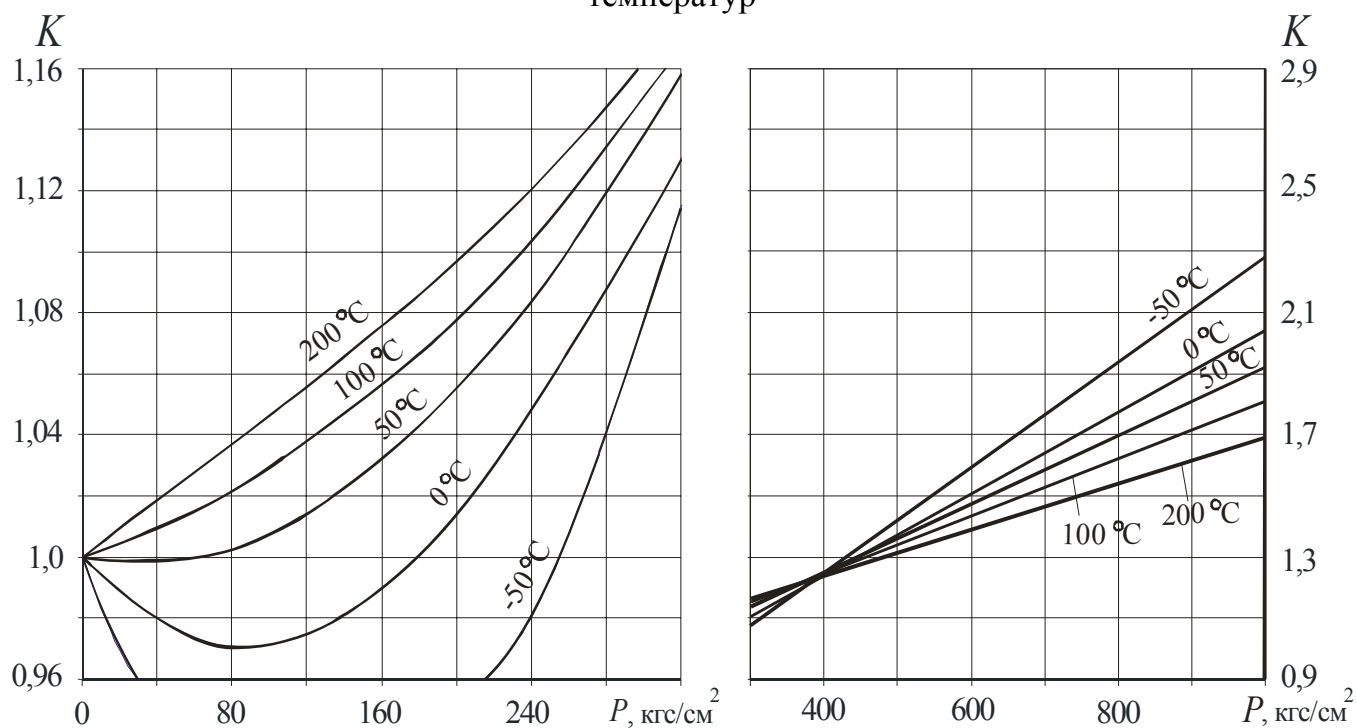


Рис. 3.8. Коэффициент сжимаемости оксида углерода для различных давлений и температур

Плотность смеси сухих газов (газообразного топлива, продуктов горения) при стандартных условиях, кг/м^3 , подсчитывают по эмпирической формуле

$$\rho_c = 0,0196\text{CO}_2 + 0,0152\text{H}_2\text{S} + 0,0125\text{N}_2 + 0,0143\text{O}_2 + 0,00716\text{CH}_4 + \\ + 0,0125\text{CO} + 0,0009\text{H}_2 + \sum (0,563n + 0,045m) \frac{C_n H_m}{100}, \quad (3.16)$$

где CO_2 , H_2S , N_2 , O_2 , CH_4 , CO , H_2 – объемное содержание соответствующих компонентов газовой смеси, %; n и m – число атомов химических веществ в составе непредельных углеводородов (C_nH_m); коэффициенты перед химическими символами – плотность соответствующих компонентов, разделенная на 100.

При элементном анализе газообразного топлива доля непредельных углеводородов дается, как правило, в общем виде. Учитывая, что последние состоят главным образом из этилена (C_2H_4) и по абсолютному значению содержание их в смеси сравнительно невелико (до 3%), допустимо в формуле (3.16) общую долю непредельных углеводородов заменить долей этилена.

Плотность жидкого топлива определяют лабораторными методами с помощью ареометров (нефтеденсиметров), пикнометров или гидростатических весов при 20 °С. Точность определения зависит от вязкости топлива и применяемого метода и составляет $\pm(0,0003-0,001)$ кг/дм³. Если по данным анализа известна плотность жидкого топлива при стандартной температуре t_c , то значение ее, кг/м³, при рабочей температуре t равно

$$\rho = \rho_c - \beta'(t - t_c), \quad (3.17)$$

где ρ и ρ_c – плотность жидкого топлива соответственно при рабочей и стандартной температуре, кг/м³; β' – коэффициент, зависящий от плотности жидкого топлива в соответствии с данными табл. 2.9.

Таблица 2.9

Значения коэффициента β' для жидких топлив в формуле (3.17)

ρ при 20 °С, т/м ³	β' , т/(м ³ ·°С)	ρ при 20 °С, т/м ³	β' , т/(м ³ ·°С)
0,6900...0,6999	0,000910	0,8500...0,8599	0,000699
0,7100...0,7199	0,000884	0,8700...0,8799	0,000673
0,7300...0,7399	0,000857	0,8900...0,8999	0,000647
0,7500...0,7599	0,000831	0,9100...0,9199	0,000620
0,7700...0,7799	0,000805	0,9300...0,9399	0,000594
0,7900...0,7999	0,000778	0,9500...0,9599	0,000567
0,8100...0,8199	0,000752	0,9700...0,9799	0,000541
0,8300...0,8399	0,000725	0,9900...1,0000	0,000515

3.4. Расход газа, приведенный к стандартным условиям

В промышленных измерениях часто необходимо состояние газа относить к стандартному. Как было сказано выше, за стандартное принимают его состояние при 20 °С (293,15 К) и давлении 760 мм рт. ст. (101,3 кПа).

Величину объемного расхода, приведенную к стандартным условиям, определяют по формуле (2.26).

В некоторых случаях контролируемая среда представляет собой влажный газ, а требуется определить расход сухого газа, приведенный к стандартным условиям. Формула (2.24) дает значение массового расхода газа, включая содержащуюся в нем влагу. Следовательно, массовый расход сухого газа определится по формуле

$$q_{md} = q_m \frac{\rho_d}{\rho} . \quad (3.18)$$

Для получения объемного расхода газа в стандартном состоянии необходимо массовый расход сухого газа q_{md} , содержащийся во влажном газе, разделить на ρ_{dc} , то есть на плотность сухого газа в стандартных условиях. В результате получим

$$q_{cd} = \frac{q_{md}}{\rho_{dc}} . \quad (3.19)$$

3.5. Обработка показаний дифманометров

Показания жидкостных дифманометров при измерении расхода жидкости, водяного пара или воздуха (газа) приводят к действительному значению по следующим формулам.

При применении жидкостных однострубных дифманометров

$$h_d = h_{изм} \left[(1 - \beta t) + d_1^2 / D_1^2 \right] , \quad (3.20)$$

где $h_{изм}$ – измеренная высота столба рабочей жидкости в дифманометре, м; d_1 , D_1 – внутренний диаметр соответственно трубки и чашки дифманометра, м; t – температура рабочей жидкости в дифманометре, °С; β – коэффициент объемного расширения рабочей жидкости в дифманометре. Значения коэффициента β для применяемых в дифманометре рабочих жидкостей (не смешивающихся с водой) следующие (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Значения коэффициентов объемного расширения жидкостей дифманометров

Жидкость	Ртуть	Хлороформ	Сероуглерод	Бензол
β , 1/°С	0,0001815	0,001197	0,00108	0,00114...0,00128

При применении жидкостных двухтрубных (U -образных) дифманометров

$$h_d = h_{изм} (1 - \beta t) , \quad (3.21)$$

где $h_{изм} = h_1 + h_2$; здесь h_1 , h_2 – высота столба рабочей жидкости соответственно в левом и правом коленах дифманометра, мм.

При применении автоматизированной системы измерений с использованием преобразователей с унифицированным токовым сигналом и деформационных дифманометров перепад на СУ

$$\Delta p = \Delta p_{усл} k_{п} + \Delta p_{инс} , \quad (3.22)$$

где $\Delta p_{усл}$ – разность давлений, измеренная в условных единицах, мА, мВ; $k_{п}$ – переводной коэффициент из условных единиц в абсолютные, кПа/мА, кПа/мВ; $\Delta p_{инс}$ – инструментальная поправка (систематическая погрешность), определенная путем сравнения с образцовым прибором до и после испытаний.

При использовании жидкостных дифманометров (однострубных или двухтрубных) перепад давления на СУ, Па (Н/м²),

$$\Delta p = 0,001 h_d (\rho_{p.ж} - \rho_{б.ж}) \cdot 9,81, \quad (3.23)$$

где h_d – действительное значение высоты уровня рабочей жидкости в однострубно-м дифманометре или разность столбов рабочей жидкости в двухтрубном дифманометре, мм; $\rho_{p.ж}$ и $\rho_{б.ж}$ – плотность соответственно рабочей и буферной жидкости в дифманометре, кг/м³.

Если над рабочей жидкостью в дифманометре находится воздух (газ), то $\rho_{б.ж}$ в формуле (3.23) можно пренебречь.

4. РАСЧЕТ ДИАМЕТРА ОТВЕРСТИЯ ДИАФРАГМЫ И ШКАЛЫ ДИФМАНОМЕТРА

Расчет диаметра отверстия диафрагмы и шкалы дифманометра производят при проектировании систем измерения расхода с использованием сужающих устройств. Расчет производят для заданной измеряемой среды с использованием следующих данных об условиях измерений:

- давление и температура среды перед диафрагмой p, t ;
- плотность измеряемой среды ρ ;
- коэффициент динамической (кинематической) вязкости среды μ (v);
- диаметр трубопровода в рабочих условиях D ;
- максимальный и минимальный массовый расход вещества q_{max}, q_{min} ;
- допустимые необратимые потери давления на диафрагме Δp_{max} ;
- температура окружающей среды при проведении измерений t_h ;
- наличие и вид местных сопротивлений до и после диафрагмы;
- длина прямолинейного участка трубопровода между местным сопротивлением и диафрагмой.

Если измеряемая среда газ, то дополнительно необходимо задать его относительную влажность, состав газа в процентах по объему и среднее местное барометрическое давление.

В зависимости от внешних воздействий, действующих при проведении измерений, и изложенных выше данных, производят выбор типа дифференциального манометра. При выборе шкалы прибора, а вместе с тем и максимального (предельного) расхода q_{max} необходимо учитывать, что для дифференциальных манометров основная погрешность выражена в процентах к предельному значению шкалы прибора. Вследствие этого для обеспечения наименьшей погрешности измерения расхода вещества желательно, чтобы постоянно измеряемый расход вещества прибором был как можно ближе к заданному максимальному расходу, соответствующему верхнему пределу шкалы прибора.

Выбранный минимальный расход вещества q_{min} или соответственно минимальный перепад давления Δp_{min} должен удовлетворять условию

$$\frac{q_{max}}{q_{min}} \leq 3,3 \text{ или } \frac{\Delta p_{max}}{\Delta p_{min}} \leq 10, \quad (4.1)$$

где Δp_{\max} – максимальный перепад давлений, соответствующий предельному значению шкалы прибора.

В противном случае погрешность измерений будет недопустимо велика. Чем больше будет выбрано значение Δp_{\max} , тем меньше будет величина относительного диаметра β и выше точность измерений. Однако, выбирая Δp_{\max} необходимо учитывать, что при большой величине перепада может быть превышено ограничение по необратимым потерям давления на диафрагме. В первом приближении должно удовлетворяться условие

$$\Delta p_{\max} < 2\Delta\omega_{\max} . \quad (4.2)$$

Расчет диаметра отверстия диафрагмы производится путем последовательного решения прямой задачи определения расхода по соотношениям раздела 2 для ряда значений β . Для этого организуется следующий итерационный процесс:

$$\beta^{k+1} = \left(\frac{4q_{\max}}{C_{-}^k E^k K_{\text{ш}}^k K_{\text{п}}^k K_{\text{Re}}^k \varepsilon^k D \sqrt{2\rho\Delta p_{\max}}} \right)^{0,5} ; \quad (4.3)$$

$$d^{k+1} = D\beta^{k+1} , \quad (4.4)$$

где индекс k соответствует предыдущей итерации; индекс $k+1$ – последующей. Параметры, входящие в формулу (4.3) с предыдущей итерации, вычисляются по соотношениям раздела 2.

В качестве первого приближения принимается значение относительного диаметра, равное:

$$\beta^1 = 0,65 \dots 0,7 . \quad (4.5)$$

Обычно для получения удовлетворительной точности достаточно выполнить 5...7 итераций.

После завершения итерационного процесса находится диаметр отверстия диафрагмы в рабочих условиях:

$$d = D\beta \quad (4.6)$$

и чертежный размер диаметра диафрагмы (диаметр отверстия при 20 °С):

$$d_{20} = \frac{d}{1 + \gamma(t - 20)} . \quad (4.7)$$

Определяются потери давления на диафрагме по формуле (2.27). Если потери давления превышают допустимую по условиям технологического процесса величину, то следует уменьшить величину перепада Δp_{\max} и вновь повторить расчет.

5. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММ РАСЧЕТА

Для удобства использования изложенных в данном пособии методик разработаны программы, написанные на языке Visual Basic, интегрированном в среду MS Excel. Программы содержатся в двух файлах, прилагаемых к настоящему пособию. Файл «Diaphragm.xls» содержит программу расчета расхода при его измерениях с использованием стандартных диафрагм, а также погрешности определения

расхода. Файл «Beta diaphragm. xls» содержит программу расчета диаметра отверстия стандартной диафрагмы для измерения заданной величины расхода.

Если среда MS Excel на Вашем компьютере настроена на высокую степень защиты от вирусов*, то при открытии файла работа программы будет заблокирована операционной системой. Для того чтобы имелась возможность работы с программой, следует закрыть открываемый Вами файл и, пользуясь меню MS Excel, выполнить команду: Сервис/Макросы/Безопасность. В появившемся диалоговом окне задать средний уровень безопасности и вновь открыть файл. При открытии файла в появившемся диалоговом окне нажать кнопку «Не отключать макросы».

Обе программы имеют одинаковый интерфейс, а именно содержат два листа: «Данные» и «Результаты». На листе «Данные» расположены таблицы ввода исходных данных задачи и кнопка запуска программы на исполнение. После завершения решения решения автоматически открывается лист «Результаты», на котором располагаются таблицы с результатами расчетов. Наименование и обозначение параметров, заносимых в таблицы, совпадают с использованными в настоящем пособии и не требуют дополнительных пояснений.

Внимание! Во избежание нарушения работоспособности программы запрещается переименовывать листы, переносить таблицы ввода исходных данных задачи (даже в пределах одного листа).

6. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

6.1. Расчет расхода воды

Определить массовый расход воды, протекающей по трубопроводу с установленной диафрагмой, и погрешность определения расхода. Плотность воды определяется косвенным методом. Система измерения регистрируемых параметров (Δp , p , t) состоит из первичных преобразователей – датчиков и вторичных показывающих приборов. Исходные данные с характеристиками системы измерения расхода и результатами измерений приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Исходные данные примера расчета расхода воды

Наименование и размерность параметра	Обозначение	Величина
Диаметр трубопровода при 20 °С, мм	D_{20}	200
Диаметр отверстия диафрагмы при 20 °С, мм	d_{20}	120
Давление воды перед диафрагмой (абсолютное), МПа	p	2
Температура воды, °С	t	75
Перепад давления на диафрагме, кПа	Δp	49

* Такая настройка обычно задается по умолчанию при установке MS Office.

Окончание табл. 6.1

Наименование и размерность параметра	Обозначение	Величина
Тип диафрагмы	—	С угловым отбором Δp
Материал трубопровода	—	Сталь 20
Состояние внутренней поверхности трубопровода	—	Ржавая
Межповерочный интервал диафрагмы, год	$\tau_{п.п}$	3
Материал диафрагмы	—	12X18H9T
Местное сопротивление перед диафрагмой	—	Задвижка
Длина прямолинейного участка трубопровода перед диафрагмой, м	L_1	2,7
Смещение оси диафрагмы относительно оси трубопровода, мм	e_x	1,5
Толщина диска диафрагмы, мм	E_d	5,5
Высота уступа на участке трубопровода перед диафрагмой (составной трубопровод), мм	h	3
Тип датчика измерения перепада давления на диафрагме	—	Метран-100-ДД-1422
Тип датчика абсолютного давления перед диафрагмой	—	Метран-100-ДА-1050
Тип датчика температуры воды	—	ТСМУ Метран-274
Тип показывающих приборов	—	Метран-620

Результаты расчета расхода воды приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Результаты расчета расхода воды

Наименование, обозначение и размерность параметра	Номер расчетной формулы	Величина
Диаметр паропровода при 75 °С D , мм	(2.1)	200,12
Диаметр отверстия диафрагмы при 75 °С d , мм	(2.2)	120,11
Относительный диаметр отверстия диафрагмы β	(1.2)	0,6
Плотность воды при рабочих условиях ρ , кг/м ³	Таблица П.7	975,6
Коэффициент скорости входа E	(1.23)	1,0719
Коэффициент истечения при числе Рейнольдса $Re \rightarrow \infty C_\infty$	(2.5)	0,603
Эквивалентная шероховатость трубопровода $R_{ш}$, мм	Таблица 2.4	0,3
Поправка на влияние шероховатости стенки ИТ $K_{ш}$ при $A_{Re} = 0,5$	(2.7), (2.8)	1,0097
Поправка на притупление входной кромки диафрагмы $K_{п}$	(2.13), (2.14)	1,004
Коэффициент расширения среды ε	—	1,0

Окончание табл. 6.2

Наименование, обозначение и размерность параметра	Номер расчетной формулы	Величина
Массовый расход при $Re \rightarrow \infty$ $q_{m\infty}$, кг/с	(2.4)	72,65
Число Рейнольдса Re_∞	(2.18)	$1,206 \cdot 10^6$
Поправка на конечность числа Рейнольдса K_{Re}	(2.19)	1,001
Действительное число Рейнольдса Re	(2.20)	$1,207 \cdot 10^6$
Коэффициент A_{Re}	(2.21), (2.22)	1,0
Действительный массовый расход q_m , кг/с	(2.24)	73,43
Минимальная потребная длина прямолинейного трубопровода от задвижки до диафрагмы L_{k1} , м	(1.1)	2,84
Минимальная потребная длина прямолинейного трубопровода за диафрагмой L_{k1} , м	(1.1)	1,29

Результаты расчета погрешности определения расхода воды приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Результаты расчета погрешности определения расхода воды

Наименование, обозначение и размерность параметра	Номер расчетной формулы	Величина
Методическая (неисключенная систематическая) погрешность, обусловленная недостаточной длиной прямолинейного участка ИТ до диафрагмы $\bar{\delta}_L$, %	(2.52)	0,06
Методическая (неисключенная систематическая) погрешность, обусловленная наличием уступа перед диафрагмой $\bar{\delta}_h$, %	—	0,0
Методическая (неисключенная систематическая) погрешность, обусловленная смещением оси диафрагмы относительно оси ИТ $\bar{\delta}_{e_x}$, %	(2.53)	0,3
Методическая (неисключенная систематическая) погрешность, обусловленная недостаточной толщиной диска диафрагмы $\bar{\delta}_E$, %	(2.54)–(2.56)	0,0
Методическая (неисключенная систематическая) погрешность, обусловленная шероховатостью трубопровода $\bar{\delta}_{ш}$, %	(2.57)	1,94
Методическая (неисключенная систематическая) погрешность, обусловленная недостоверными данными о притуплении входной кромки $\bar{\delta}_к$, %	(2.58)	0,41

Продолжение табл. 6.3

Наименование, обозначение и размерность параметра	Номер расчетной формулы	Величина
Методическая (неисключенная систематическая) погрешность расчета коэффициента истечения $\bar{\delta}_C, \%$	(2.51)	2,20
Неисключенная систематическая погрешность определения $D \bar{\delta}_D, \%$	—	0,4
Неисключенная систематическая погрешность определения $d \bar{\delta}_d, \%$	—	0,07
Методическая (неисключенная систематическая) погрешность расчета коэффициента расширения $\bar{\delta}_\varepsilon, \%$	—	0
Предельная допускаемая погрешность (неисключенная систематическая) датчика разности давлений Метран-100-ДД-1422 $\bar{\delta}_{\Delta p_1}, \%$	Каталог продукции «Метран»; раздел 2.3.2	0,29
Верхний предел измерения разности давлений датчика Метран-100-ДД-1422 $\Delta p_{\max}, \text{Па}$	Каталог продукции «Метран»	63000
Случайная составляющая погрешности датчика разности давлений Метран-100-ДД-1422 $\tilde{\delta}_{\Delta p_1}, \%$	Раздел 2.3.2	0
Предельная допускаемая погрешность (неисключенная систематическая) датчика абсолютного давления Метран-100-ДА-1050 $\bar{\delta}_{\Delta p_1}, \%$	Каталог продукции «Метран»; раздел 2.3.2	0,25
Верхний предел измерения абсолютного давления датчика Метран-100-ДА-1050 $p_{\max}, \text{МПа}$	Каталог продукции «Метран»	2,5
Случайная составляющая погрешности датчика абсолютного давления Метран-100-ДА-1050 $\tilde{\delta}_{p_1}, \%$	Раздел 2.3.2	0
Предельная допускаемая погрешность (неисключенная систематическая) датчика температуры ТСМУ Метран-274 $\bar{\delta}_{t_1}, \%$	Каталог продукции «Метран»; раздел 2.3.2	0,25
Пределы измерения температуры датчика ТСМУ Метран-274 $t_{\min} - t_{\max}, ^\circ\text{C}$	Каталог продукции «Метран»	0–100
Случайная составляющая погрешности датчика температуры $\tilde{\delta}_{t_1}, \%$	Раздел 2.3.2	0

Наименование, обозначение и размерность параметра	Номер расчетной формулы	Величина
Предельная допускаемая погрешность (неисключенная систематическая) автономного индикатора Метран-620: $\bar{\delta}_{\Delta p_2}$, $\bar{\delta}_{p_2}$, $\bar{\delta}_{t_2}$, %	Каталог продукции «Метран»»; раздел 2.3.2	0,7
Случайная составляющая погрешности автономного индикатора Метран-620: $\tilde{\delta}_{\Delta p_2}$, $\tilde{\delta}_{p_2}$, $\tilde{\delta}_{t_2}$, %	Раздел 2.3.2	0
Суммарная неисключенная систематическая составляющая погрешности измерения перепада давления $\bar{\delta}_{\Delta p}$, %	(6.1)	0,79
Суммарная случайная составляющая погрешности измерения перепада давления $\tilde{\delta}_{\Delta p}$, %	(2.66)	0
Суммарная неисключенная систематическая составляющая погрешности измерения абсолютного давления $\bar{\delta}_p$, %	(6.1)	0,7
Суммарная случайная составляющая погрешности измерения абсолютного давления $\tilde{\delta}_p$, %	(2.71)	0
Суммарная неисключенная систематическая составляющая погрешности измерения температуры $\bar{\delta}_t$, %	(6.2)	0,93
Суммарная случайная составляющая погрешности измерения температуры $\tilde{\delta}_t$, %	(2.73)	0
Коэффициент влияния температуры на плотность ν_T	(6.3)	0,047
Коэффициент влияния давления на плотность ν_p	(6.4)	$9 \cdot 10^{-4}$
Неисключенная систематическая составляющая погрешности определения плотности $\bar{\delta}_\rho$, %	(2.69)	0,13
Случайная составляющая погрешности определения плотности $\tilde{\delta}_\rho$, %	(2.70)	0
Неисключенная систематическая составляющая погрешности определения расхода $\bar{\delta}_q$, %	(2.43)	2,25
Случайная составляющая погрешности определения расхода $\tilde{\delta}_q$, %	(2.44)	0
Суммарная относительная погрешность определения расхода δ_q , %	(2.40)	2,25

Так как для выбранных средств измерения отсутствуют данные по составляющим их погрешности, то, в соответствии с рекомендациями раздела 2.3.2, предельную допускаемую погрешность относим к неисключенной систематической погрешности. Систематическую и случайную составляющие погрешности средств измерения принимаем равными нулю.

В соответствии с данными изготовителя средств измерений предел допускаемой погрешности Δp и p отнесен к верхнему значению диапазона измерения, предел допускаемой погрешности t – к диапазону измерения. Предел допускаемой погрешности автономного индикатора отнесен к текущему значению измеряемой величины. Учитывая изложенное, неисключенная составляющая погрешности измерения перепада давления и абсолютного давления определена по формуле

$$\bar{\delta}_y = \left[\left(\frac{y}{y_{\max}} \bar{\delta}_{y_1} \right)^2 + \delta_{y_2}^2 \right]^{0,5}, \quad (6.1)$$

где $y = \Delta p, p$ – измеряемый параметр; $\delta_{y_1}, \delta_{y_2}$ – предел допускаемой погрешности датчика и автономного индикатора соответственно.

Неисключенная составляющая погрешности измерения температуры

$$\bar{\delta}_y = \left[\left(\frac{t}{t_{\max} - t_{\min}} \bar{\delta}_{t_1} \right)^2 + \delta_{t_2}^2 \right]^{0,5}, \quad (6.2)$$

где $\delta_{t_1}, \delta_{t_2}$ – предел допускаемой погрешности датчика и автономного индикатора соответственно.

Коэффициенты влияния температуры и давления на плотность определены с использованием конечных разностей (численные значения см. табл. П.7):

$$\nu_T = \frac{t}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} \approx \frac{t}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta t} = \frac{75}{975,6} \frac{978,6 - 972,5}{70 - 80} = 0,047; \quad (6.3)$$

$$\nu_p = \frac{p}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} \approx \frac{p}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta p} = \frac{20}{975,6} \frac{976,9 - 974,7}{50 - 1} = 9 \cdot 10^{-4}. \quad (6.4)$$

Систематическая и случайная составляющие определения плотности при стандартных условиях $\bar{\delta}_{\rho_c}, \tilde{\delta}_{\rho_c}$ и методические погрешности определения плотности $\bar{\delta}_{\rho_0}, \tilde{\delta}_{\rho_0}$ приняты равными нулю ввиду отсутствия данных по этим составляющим погрешности.

6.2. Расчет расхода пара

Определить массовый расход пара, протекающего по трубопроводу с установленной диафрагмой, и погрешность определения расхода. Плотность пара определяется косвенным методом. Система измерения регистрируемых параметров ($\Delta p, p, t$) состоит из первичных преобразователей – датчиков и вторичных показывающих приборов. Исходные данные с характеристиками системы измерения расхода и результатами измерений приведены в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Исходные данные примера расчета расхода пара

Наименование и размерность параметра	Обозначение	Величина
Диаметр трубопровода при 20 °С, мм	D_{20}	100
Диаметр отверстия диафрагмы при 20 °С, мм	d_{20}	69
Давление пара перед диафрагмой (абсолютное), МПа	p	2,5
Температура пара, °С	t	380
Перепад давления на диафрагме, кПа	Δp	16
Тип диафрагмы	—	С фланцевым отбором Δp
Материал трубопровода	—	12X18Н9Т
Состояние внутренней поверхности трубопровода (труба сварная)	—	Новая
Межповерочный интервал диафрагмы, год	$\tau_{п.п}$	2
Материал диафрагмы	—	12X18Н10Т
Местное сопротивление перед диафрагмой	—	Струевыпрямитель
Длина прямолинейного участка трубопровода перед диафрагмой, м	L_1	1,5
Смещение оси диафрагмы относительно оси трубопровода, мм	e_x	1,0
Толщина диска диафрагмы, мм	E_d	4,5
Высота уступа на участке трубопровода перед диафрагмой (составной трубопровод), мм	h	1,0
Тип датчика измерения перепада давления на диафрагме	—	Метран-100-ДД-1430
Тип датчика измерения абсолютного давления перед диафрагмой	—	Метран-100-ДА-1060
Тип датчика температуры пара	—	ТСПУ Метран-276
Тип показывающих приборов	—	Метран-620

Результаты расчета приведены в табл. 6.5 и табл. 6.6.

Таблица 6.5

Результаты расчета расхода пара

Наименование, обозначение и размерность параметра	Номер расчетной формулы	Величина
Диаметр паропровода при 75 °С D , мм	(2.1)	100,64
Диаметр отверстия диафрагмы при 75 °С d , мм	(2.2)	69,44
Относительный диаметр отверстия диафрагмы β	(1.2)	0,69
Плотность пара при рабочих условиях ρ , кг/м ³	Таблица П.18	8,446
Вязкость пара при рабочих условиях Па·с	Таблица П.1	$23,53 \cdot 10^{-6}$
Показатель адиабаты k	Таблица П.4	1,31
Коэффициент скорости входа E	(1.23)	1,137

Окончание табл. 6.5

Наименование, обозначение и размерность параметра	Номер расчетной формулы	Величина
Коэффициент истечения при числе Рейнольдса $Re \rightarrow \infty C$	(2.5)	0,605
Эквивалентная шероховатость трубопровода $R_{ш}$, мм	Таблица 2.4	0,1
Поправка на влияние шероховатости стенки ИТ $K_{ш}$ при $A_{Re} = 0,5$	(2.7), (2.8)	1,003
Поправка на притупление входной кромки диафрагмы $K_{п}$	(2.13), (2.14)	1,007
Коэффициент расширения среды ε	(2.16)	0,997
Массовый расход при $Re \rightarrow \infty q_{m\infty}$, кг/с	(2.4)	1,365
Число Рейнольдса Re_{∞}	(2.18)	$7,337 \cdot 10^5$
Поправка на конечность числа Рейнольдса K_{Re}	(2.19)	1,0024
Действительное число Рейнольдса Re	(2.20)	$7,354 \cdot 10^5$
Коэффициент A_{Re}	(2.21), (2.22)	0,996
Действительный массовый расход q_m , кг/с	(2.24)	1,372
Минимальная потребная длина прямолинейного трубопровода от задвижки до диафрагмы L_{k1} , м	(1.1)	2,2
Минимальная потребная длина прямолинейного трубопровода за диафрагмой L_{k1} , м	(1.1)	0,7

Таблица 6.6

Результаты расчета погрешности определения расхода

Наименование, обозначение и размерность параметра	Номер расчетной формулы	Величина
Методическая (неисключенная систематическая) погрешность, обусловленная недостаточной длиной прямолинейного участка ИТ до диафрагмы $\bar{\delta}_L$, %	(2.52)	0,206
Методическая (неисключенная систематическая) погрешность, обусловленная наличием уступа перед диафрагмой $\bar{\delta}_h$, %	—	0
Методическая (неисключенная систематическая) погрешность, обусловленная смещением оси диафрагмы относительно оси ИТ $\bar{\delta}_{e_x}$, %	(2.53)	0,3
Методическая (неисключенная систематическая) погрешность, обусловленная недостаточной толщиной диска диафрагмы $\bar{\delta}_E$, %	(2.54)–(2.56)	0

Продолжение табл. 6.6

Наименование, обозначение и размерность параметра	Номер расчетной формулы	Величина
Методическая (неисключенная систематическая) погрешность, обусловленная шероховатостью трубопровода $\bar{\delta}_{ш}$, %	(2.57)	0,67
Методическая (неисключенная систематическая) погрешность, обусловленная недостоверными данными о притуплении входной кромки $\bar{\delta}_к$, %	(2.58)	0,72
Методическая (неисключенная систематическая) погрешность расчета коэффициента истечения $\bar{\delta}_C$, %	(2.51)	1,55
Неисключенная систематическая погрешность определения D $\bar{\delta}_D$, %	—	0,4
Неисключенная систематическая погрешность определения d $\bar{\delta}_d$, %	—	0,07
Методическая (неисключенная систематическая) погрешность расчета коэффициента расширения $\bar{\delta}_\varepsilon$, %	(2.65)	0,03
Предельная допускаемая погрешность (неисключенная систематическая) датчика разности давлений Метран-100-ДД-1430 $\bar{\delta}_{\Delta p_1}$, %	Каталог продукции «Метран»; раздел 2.3.2	0,29
Верхний предел измерения разности давлений датчика Метран-100-ДД-1422 Δp_{\max} , Па	Каталог продукции «Метран»	40000
Случайная составляющая погрешности датчика разности давлений Метран-100-ДД-1422 $\tilde{\delta}_{\Delta p_1}$, %	Раздел 2.3.2	0
Предельная допускаемая погрешность (неисключенная систематическая) датчика абсолютного давления Метран-100-ДА-1050 $\bar{\delta}_{\Delta p_1}$, %	Каталог продукции «Метран»; раздел 2.3.2	0,34
Верхний предел измерения абсолютного давления датчика Метран-100-ДА-1050 p_{\max} , МПа	Каталог продукции «Метран»	16
Случайная составляющая погрешности датчика абсолютного давления Метран-100-ДА-1050 $\tilde{\delta}_{p_1}$, %	Раздел 2.3.2	0

Продолжение табл. 6.6

Наименование, обозначение и размерность параметра	Номер расчетной формулы	Величина
Предельная допускаемая погрешность (неисключенная систематическая) датчика температуры ТСМУ Метран-274 $\bar{\delta}_{t_1}$, %	Каталог продукции «Метран»; раздел 2.3.2	0,25
Пределы измерения температуры датчика ТСМУ Метран-276 $t_{\min} - t_{\max}$, °C	Каталог продукции «Метран»	0–600
Случайная составляющая погрешности датчика температуры $\tilde{\delta}_{t_1}$, %	Раздел 2.3.2	0
Предельная допускаемая погрешность (неисключенная систематическая) автономного индикатора Метран-620: $\bar{\delta}_{\Delta p_2}$, $\bar{\delta}_{p_2}$, $\bar{\delta}_{t_2}$, %	Каталог продукции «Метран»; раздел 2.3.2	0,7
Случайная составляющая погрешности автономного индикатора Метран-620: $\tilde{\delta}_{\Delta p_2}$, $\tilde{\delta}_{p_2}$, $\tilde{\delta}_{t_2}$, %	Раздел 2.3.2	0
Суммарная неисключенная систематическая составляющая погрешности измерения перепада давления $\bar{\delta}_{\Delta p}$, %	(6.1)	1,008
Суммарная случайная составляющая погрешности измерения перепада давления $\tilde{\delta}_{\Delta p}$, %	(2.66)	0
Суммарная неисключенная систематическая составляющая погрешности измерения абсолютного давления $\bar{\delta}_p$, %	(6.1)	0,7
Суммарная случайная составляющая погрешности измерения абсолютного давления $\tilde{\delta}_p$, %	(2.71)	0
Суммарная неисключенная систематическая составляющая погрешности измерения температуры $\bar{\delta}_t$, %	(6.2)	1,15
Суммарная случайная составляющая погрешности измерения температуры $\tilde{\delta}_t$, %	(2.73)	0
Коэффициент влияния температуры на плотность υ_T	Раздел 2.3.5	1
Коэффициент влияния давления на плотность υ_p	Раздел 2.3.5	1
Неисключенная систематическая составляющая погрешности определения плотности $\bar{\delta}_\rho$, %	(2.69)	1,314

Наименование, обозначение и размерность параметра	Номер расчетной формулы	Величина
Случайная составляющая погрешности определения плотности $\tilde{\delta}_p$, %	(2.70)	0
Неисключенная систематическая составляющая погрешности определения расхода $\bar{\delta}_q$, %	(2.45)	1,95
Случайная составляющая погрешности определения расхода $\tilde{\delta}_q$, %	(2.46)	0
Суммарная относительная погрешность определения расхода δ_q , %	(2.40)	1,95

6.3. Расчет расхода газа

Определить расход доменного газа, протекающего по трубопроводу с установленной диафрагмой. Исходные данные с характеристиками трубопровода, диафрагмы и результатами измерений приведены в табл. 6.7.

Таблица 6.7

Исходные данные примера расчета расхода доменного газа

Наименование и размерность параметра	Обозначение	Величина
Диаметр трубопровода при 20 °С, мм	D_{20}	600
Диаметр отверстия диафрагмы при 20 °С, мм	d_{20}	350
Давление газа перед диафрагмой (абсолютное), кПа	p	104,25
Температура газа, °С	t	30
Перепад давления на диафрагме, Па	Δp	245
Тип диафрагмы	—	С фланцевым отбором Δp
Материал трубопровода	—	Сталь 35
Состояние внутренней поверхности трубопровода (труба сварная)	—	Новая
Межповерочный интервал диафрагмы, год	$\tau_{п.п}$	3
Материал диафрагмы	—	12X18Н9Т
Местное сопротивление перед диафрагмой	—	Одиночное колено
Длина прямолинейного участка трубопровода перед диафрагмой, м	L_1	10,5
Смещение оси диафрагмы относительно оси трубопровода, мм	e_x	3,0
Толщина диска диафрагмы, мм	E_d	6,5

Состав газа приведен в табл. 6.8.

Таблица 6.8

Состав доменного газа

Компонент	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂
$\gamma_i, \%$	13	26	1	0,1	35,5

Относительная влажность газа при рабочих условиях равна 40%.

Определим физические свойства газа при рабочих условиях.

Плотность сухой части газа при стандартных условиях определяем по формуле (3.10) и данным табл. П.4:

$$\rho_{dc} = \frac{\gamma_{CO_2} \rho_{с CO_2} + \gamma_{CO} \rho_{с CO} + \gamma_{H_2} \rho_{с H_2} + \gamma_{CH_4} \rho_{с CH_4} + \gamma_{N_2} \rho_{с N_2}}{100} =$$

$$= \frac{13 \cdot 1,842 + 26 \cdot 1,105 + 1 \cdot 0,0837 + 0,1 \cdot 0,6679 + 59,9 \cdot 1,166}{100} = 1,237 \text{ кг/м}^3.$$

Плотность сухого газа при рабочих условиях определяем по формуле (3.14):

$$\rho_d = \rho_{dc} \frac{(p_1 - \varphi p_{н.п.}) T_c}{T p_c} = 1,237 \frac{(104,25 - 0,4 \cdot 4,24) \cdot 293,15}{303,15 \cdot 101,3} = 1,211 \text{ кг/м}^3.$$

Плотность влажного газа при рабочих условиях определяем по формуле (3.13) и данным табл. П.5:

$$\rho_\varphi = \rho_d + \rho_\Pi = \rho_d + \varphi p_{н.п.} = 1,211 + 0,4 \cdot 0,03036 = 1,223 \text{ кг/м}^3. \quad (6.5)$$

Показатель адиабаты коксового газа по формуле (3.12) и данным табл. П.4:

$$k = \frac{13 \cdot 1,3 + 26 \cdot 1,4 + 1 \cdot 1,41 + 0,1 \cdot 1,31 + 59,9 \cdot 1,4}{100} = 1,387. \quad (6.6)$$

Коэффициент динамической вязкости доменного газа при рабочих условиях, определенный по формулам (3.5)–(3.7) и данным табл. П.4

$$\mu = 17,43 \cdot 10^{-6} \text{ Па·с}. \quad (6.7)$$

Результаты расчета расхода приведены в таблице 6.9.

Таблица 6.9

Результаты расчета массового расхода доменного газа

Наименование, обозначение и размерность параметра	Номер расчетной формулы	Величина
Диаметр трубопровода при 30 °С D , мм	(2.1)	600,09
Диаметр отверстия диафрагмы при 30 °С d , мм	(2.2)	350,04
Относительный диаметр отверстия диафрагмы β	(1.2)	0,583
Плотность газа при рабочих условиях ρ , кг/м ³	(6.5)	1,223
Вязкость газа при рабочих условиях μ , Па·с	(6.7)	$17,43 \cdot 10^{-6}$
Показатель адиабаты k	(6.6)	1,387
Коэффициент скорости входа E	(1.23)	1,063
Коэффициент истечения при числе Рейнольдса $Re \rightarrow \infty C_\infty$	(2.5)	0,6036
Эквивалентная шероховатость трубопровода $R_{ш}$, мм	Таблица 2.4	0,1

Наименование, обозначение и размерность параметра	Номер расчетной формулы	Величина
Поправка на влияние шероховатости стенки ИТ $K_{ш}$ при $A_{Re} = 0,5$	(2.7), (2.8)	0,9986
Поправка на притупление входной кромки диафрагмы $K_{п}$	(2.13), (2.14)	1,0
Коэффициент расширения среды ε	—	0,999
Массовый расход при $Re \rightarrow \infty$ $q_{m \infty}$, кг/с	(2.4)	1,509
Число Рейнольдса Re_{∞}	(2.18)	$1,837 \cdot 10^5$
Поправка на конечность числа Рейнольдса K_{Re}	(2.19)	1,0044
Действительное число Рейнольдса Re	(2.20)	$1,845 \cdot 10^5$
Коэффициент A_{Re}	(2.21), (2.22)	0,865
Действительный массовый расход q_m , кг/с	(2.24)	1,514
Массовый расход сухого газа q_{md} , кг/с	(3.18)	1,499
Объемный расход газа при рабочих условиях q_m , м ³ /с	(2.26)	1,238
Объемный расход сухого газа в стандартном состоянии q_{cd} , н м ³ /с	(3.19)	1,212
Минимальная потребная длина прямолинейного трубопровода от колена до диафрагмы L_{k1} , м	(1.1)	10,11
Минимальная потребная длина прямолинейного трубопровода за диафрагмой L_{k1} , м	(1.1)	3,8
Потеря давления на диафрагме $\Delta\omega$, Па	(2.27)	157

6.4. Расчет диаметра отверстия диафрагмы

Определить диаметр отверстия диафрагмы для измерения расхода пара при исходных данных, приведенных в табл. 6.10.

Таблица 6.10

Исходные данные примера расчета диаметра отверстия диафрагмы

Наименование и размерность параметра	Обозначение	Величина
Диаметр паропровода при 20 °С, мм	D_{20}	400
Давление пара (абсолютное), МПа	p	3
Температура пара, °С	t	400
Расход пара, кг/ч	q_{\max}	120 000
Верхний предел шкалы дифманометра, мм	H_{\max}	400
Тип дифманометра	—	Hg – H ₂ O
Температура столба рабочей жидкости в дифференциальном манометре, °С	t_h	20
Коэффициент линейного расширения материала дроссельного устройства и трубопровода, 1/°С	γ	$1,32 \cdot 10^{-5}$

Результаты расчета приведены в табл. 6.11.

Таблица 6.11

Результаты расчета диаметра отверстия диафрагмы

Наименование, обозначение и размерность параметра	Номер расчетной формулы	Величина
Перепад давления на диафрагме Δp_{\max} , Па	(4.2)	$51 \cdot 10^{-5}$
Диаметр паропровода при 400 °С D , мм	(2.1)	402,0
Показатель адиабаты пара k	Таблица П.4	1,31
Плотность пара при рабочих условиях ρ , кг/м ³	Таблица П.19	9,86
Коэффициент динамической вязкости пара в рабочих условиях μ , Па·с	Таблица П.1	$2,439 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент истечения при $Re=\infty$ C_{∞}	(2.5)	0,603
Число Рейнольдса Re_{∞}	(2.18)	$2,885 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент A_{Re}	(2.21)	1,0
Поправочный коэффициент K_{Re}	(2.19)	1,0
Поправочный коэффициент $K_{ш}$	(2.7), (2.8)	1,0038
Поправочный коэффициент $K_{п}$	(2.13), (2.14)	1,0
Величина относительного диаметра β	(4.3)	0,632
Диаметр отверстия диафрагмы в рабочих условиях d , мм	(4.6)	253,96
Диаметр отверстия диафрагмы при 20 °С d_{20} , мм	(4.7)	252,65
Потери давления на диафрагме $\Delta \omega$, кПа	(2.27)	29,64

7. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет по результатам практических занятий должен содержать:

1. Задание на проведение расчетов.
2. Основные расчетные соотношения.
3. Результаты расчетов, в том числе:
 - 3.1. Выбор диапазона шкалы дифманометра.
 - 3.2. Расчет диаметра отверстия диафрагмы на заданную величину расхода.
 - 3.3. Выбор средств измерений для определения заданной величины расхода.
 - 3.4. Расчет расхода при заданных результатах измерений.
 - 3.5. Расчет потерь давления на диафрагме.
 - 3.6. Расчет погрешности определения расхода.
4. Анализ полученных результатов.

8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит принцип определения расхода методом переменного перепада давления?
2. Дайте определение сужающего устройства.
3. Какие типы сужающих устройств применяют для измерения расхода?

4. В чем состоит отличие стандартных сужающих устройств от нестандартных?
5. Какие основные элементы включает система измерения расхода методом переменного перепада давления?
6. Какие основные требования предъявляются при установке дифманометров в процессе измерения расхода?
7. Для чего служат уравнильные (компенсационные) сосуды?
8. Как располагается дифманометр относительно СУ при измерении расхода пара, жидкости?
9. Для чего предназначен уравнильный кран, устанавливаемый при монтаже дифманометра?
10. Какие параметры среды регистрируют при измерении расхода с применением стандартных диафрагм?
11. Каким основным требованиям должен удовлетворять измерительный трубопровод при измерении расхода с помощью стандартных диафрагм?
12. Каким образом определяется плотность среды при измерении расхода с применением сужающих устройств?
13. Что собой представляет стандартная диафрагма?
14. Каковы требования, предъявляемые к радиусу входной кромки стандартной диафрагмы?
15. Какова должна быть толщина стандартной диафрагмы?
16. Какими способами производится отбор давления при измерении перепада на стандартной диафрагме?
17. Назовите условия применения стандартных диафрагм (относительный диаметр отверстия, параметры потока среды).
18. Что собой представляет стандартное сопло?
19. Какими способами производится отбор давления при измерении перепада на стандартном сопле?
20. Назовите условия применения стандартных сопел (относительный диаметр отверстия, параметры потока среды).
21. Что собой представляет стандартная труба Вентури?
22. Какие типы труб Вентури применяют для измерения расхода?
23. Что собой представляет укороченная труба Вентури?
24. Какими способами производится отбор давления при измерении перепада на стандартной трубе Вентури?
25. Назовите условия применения стандартных труб Вентури (относительный диаметр отверстия, параметры потока среды).
26. Что собой представляет стандартное сопло Вентури?
27. Какими способами производится отбор давления при измерении перепада на стандартном сопле Вентури?
28. Назовите условия применения стандартных сопел Вентури (относительный диаметр отверстия, параметры потока среды).
29. Напишите формулу для определения расхода идеальной жидкости, протекающей через СУ.

30. Какие поправочные коэффициенты применяются для учета отличия реальной среды от идеальной жидкости при определении расхода методом переменного перепада давления?

31. Перечислите основные этапы алгоритма определения расхода по результатам измерений параметров среды и перепада давления на стандартном СУ.

32. Дайте определение объемного расхода среды, приведенного к стандартным условиям.

33. С чем связаны необратимые потери давления на стандартной диафрагме, стандартном сопле?

34. С чем связаны необратимые потери давления на стандартной трубе (сопле) Вентури?

35. Какие типы погрешностей рассматриваются при оценке погрешности определения расхода?

36. Чем отличается неисключенная систематическая погрешность от случайной?; систематическая погрешность от неисключенной систематической?

37. Что такое предел основной допускаемой погрешности средства измерения?

38. Что такое предел допускаемой погрешности средства измерения?

39. Дайте определение метода косвенных измерений.

40. В чем состоит особенность определения погрешности при измерении расхода методом переменного перепада давления?

41. Каков физический смысл коэффициента влияния при расчете погрешности параметра, измеряемого косвенным методом?; как он определяется?

42. Перечислите основные допущения, принимаемые при расчете погрешности определения расхода методом переменного перепада давления.

43. Перечислите основные составляющие методической погрешности определения расхода с применением стандартных СУ.

44. Каким образом определяется вязкость среды при измерении расхода методом переменного перепада давления?

45. Каким образом определяется плотность среды при измерении расхода методом переменного перепада давления?

46. Каким образом определяется показатель адиабаты среды при измерении расхода методом переменного перепада давления?

47. Каким образом определяется объемный расход газа, приведенный к стандартным условиям и влажности 0%?

48. Каким образом выбирается диапазон шкалы дифманометра при расчете диафрагмы?

49. Как изменяется погрешность измерения расхода с уменьшением диаметра отверстия диафрагмы?

50. Как производится расчет диаметра отверстия диафрагмы на заданную величину расхода?

51. Чем обусловлено ограничение минимального диаметра отверстия диафрагмы при заданной величине расхода, заданных рабочих параметрах и физических характеристиках измеряемой среды?

ПРИЛОЖЕНИЕ. **ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ**

Таблица П.1

Коэффициент динамической вязкости пара и воды $\mu \cdot 10^6$, Па·с ($p = 0,2 \dots 12,5$ МПа)

Температура, °С	Давление, МПа							
	0,1	0,5	1,0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5
0	1792	1791	1790	1786	1780	1775	1769	1764
25	890,7	890,6	890,5	890,2	889,7	889,3	888,8	888,4
50	547,1	547,1	547,2	547,5	547,9	548,3	548,7	549,1
75	378,3	378,4	378,6	378,9	379,6	380,2	380,8	381,5
100	12,28	282,3	282,4	282,8	283,5	284,2	284,8	285,5
150	14,19	181,9	182,0	182,4	183,1	183,7	184,4	185,0
200	16,18	16,07	15,93	133,8	134,5	135,1	135,7	136,3
250	18,22	18,15	18,07	17,93	106,1	106,8	107,5	108,2
300	20,29	20,25	20,20	20,06	19,86	19,74	86,4	87,4
350	22,37	22,35	22,32	22,24	22,16	22,13	22,18	22,39
375	23,41	23,39	23,37	23,32	23,27	23,28	23,35	23,52
400	24,45	24,44	24,42	24,39	24,38	24,40	24,49	24,65
425	25,49	25,48	25,47	25,46	25,47	25,52	25,62	25,77
450	26,52	26,52	26,52	26,52	26,55	26,61	26,72	26,88
475	27,55	27,55	27,55	27,57	27,61	27,70	27,82	27,98
500	28,57	28,58	28,58	28,61	28,67	28,77	28,90	29,06
550	30,61	30,61	30,63	30,67	30,76	30,87	31,01	31,18
600	82,61	32,63	32,64	32,70	32,81	32,93	33,09	33,3
650	34,6	34,6	34,6	34,7	34,8	35,0	35,1	35,3
700	36,6	36,6	36,6	36,7	36,8	36,9	37,1	37,3

Таблица П.2

Коэффициент динамической вязкости пара и воды $\mu \cdot 10^6$, Па·с ($p = 15 \dots 35$ МПа)

Температура, °С	Давление, МПа							
	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0	35,0
0	1759	1754	1749	1744	1740	1735	1731	1722
25	888,0	887,7	887,4	887,1	886,8	886,6	886,3	886,0
50	549,6	550,0	550,4	550,9	551,4	551,8	552,3	553,3
75	382,1	382,7	383,3	384,0	384,6	385,3	385,9	387,2
100	286,2	286,9	287,5	288,2	288,9	289,5	290,2	291,6
150	185,7	186,3	186,9	187,6	188,2	188,8	189,5	190,7
200	137,0	137,6	138,2	138,8	139,4	140,0	140,5	141,7
250	108,9	109,5	110,2	110,8	111,4	112,0	112,6	113,8

Темпера- тура, °C	Давление, МПа							
	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0	35,0
300	83,3	89,2	90,0	90,9	91,7	92,4	93,2	94,6
350	22,91	66,8	69,1	71,0	72,0	74,0	75,3	77,6
375	23,84	24,45	25,77	47,4	58,2	61,9	64,5	68,2
400	24,91	25,32	25,96	27,02	28,09	33,62	43,67	55,7
425	26,01	26,34	26,80	27,44	28,36	29,70	31,74	39,26
450	27,10	27,39	27,77	28,26	28,89	29,71	30,78	33,99
475	28,19	28,46	28,79	29,20	29,70	30,31	31,06	33,07
500	29,27	29,52	29,82	30,18	30,61	31,11	31,70	33,19
550	31,39	31,62	31,89	32,19	32,54	32,93	33,4	34,4
600	33,5	33,7	33,9	34,2	34,5	34,8	35,2	36,0
650	35,5	35,7	35,9	36,2	36,5	36,7	37,1	37,8
700	37,5	37,7	37,9	38,1	38,4	38,6	38,9	39,6

Таблица П.3

Коэффициент динамической вязкости пара и воды $\mu \cdot 10^6$, Па·с ($p = 40 \dots 75$ МПа)

Темпера- тура, °C	Давление, МПа							
	40	45	50	55	60	65	70	75
0	1714	1707	1700	1693	1687	1681	1676	1671
25	885,7	885,6	885,5	885,5	885,7	885,9	886,2	886,6
50	554,3	555,3	556,4	557,5	558,6	559,7	560,9	562,1
75	388,5	389,8	391,1	392,4	393,7	395,0	396,4	397,7
100	292,9	294,2	295,6	296,9	298,2	299,6	300,9	302,2
150	191,9	193,2	194,4	195,6	196,8	198,1	199,3	200,5
200	142,8	144,0	145,1	146,2	147,3	148,4	149,5	150,6
250	115,0	116,1	117,2	118,3	119,4	120,5	121,5	122,5
300	96,0	97,3	98,6	99,8	100,9	102,1	103,2	104,3
350	79,6	81,4	83,1	84,7	86,1	87,5	88,9	90,1
375	71,1	73,5	75,6	77,4	79,2	80,8	82,2	83,7
400	61,3	64,9	67,8	70,2	72,3	74,2	75,9	77,5
425	48,62	50,0	59,4	62,7	65,4	67,7	69,7	71,5
450	39,03	45,18	50,7	55,0	58,5	61,3	63,7	65,9
475	35,93	39,71	44,1	48,4	52,2	55,4	58,2	60,6
500	35,2	37,7	40,7	44,0	47,4	50,6	53,4	56,0
550	35,6	37,1	38,9	40,8	43,0	45,2	47,4	49,6
600	37,0	38,1	39,3	40,6	42,1	43,7	45,3	46,9
650	38,6	39,4	40,4	41,4	42,6	43,7	45,0	42,2
700	40,2	41,0	41,8	42,6	43,5	44,5	45,5	46,5

Таблица П.4

Физические свойства сухих газов

Наименование газа	Химическая формула	Показатель адиабаты k при атмосферном давлении и температуре, °С				Плотность		Динамическая вязкость $\mu \cdot 10^6$, Па·с, при температуре, °С						Постоянная С
		20	200	400	600	при 0 °С и 1,0332 кгс/см ²	при 20 °С и 1,0332 кгс/см ²	-30	0	50	100	200	300	
Азот	N ₂	1,40	1,39	1,37	1,35	1,251	1,166	15,200	16,671	19,025	21,280	25,203	27,949	107
Аммиак	NH ₃	1,31	1,25	—	—	0,7710	0,7184	8,336	9,218	11,278	13,141	16,867	20,594	626
Ацетилен	C ₂ H ₂	1,23	1,19	1,10	1,15	1,171	1,091	—	9,414	11,082	12,552	—	—	198
Водород	H ₂	1,41	1,40	1,39	1,39	0,0899	0,0837	8,041	8,728	9,708	10,689	12,356	13,925	75
Воздух	—	1,40	1,39	1,37	1,35	1,293	1,205	15,592	17,358	20,006	22,261	25,988	29,714	122
Водяной пар	H ₂ O	1,31	—	—	—	0,8041	0,7496	—	8,532	—	—	—	—	673
Кислород	O ₂	1,40	1,37	1,34	1,32	1,429	1,331	17,358	19,025	21,771	24,615	29,028	32,950	138
Метан	CH ₄	1,31	1,23	1,17	1,14	0,7168	0,6679	9,316	10,297	11,964	13,533	16,083	18,338	198
Окись углерода	CO	1,40	1,30	1,37	1,35	1,250	1,165	14,710	16,671	19,025	21,280	25,203	27,949	102
Сернистый газ	SO ₃	1,26	1,22	1,20	1,19	2,927	2,727	10,199	11,670	14,024	16,279	20,692	24,517	—
Сероводород	H ₂ S	1,32	1,29	1,26	1,24	1,539	1,434	10,493	11,768	13,925	16,083	20,594	24,418	—
Углекислый газ	CO ₂	1,30	1,24	1,20	1,19	1,977	1,842	12,749	14,122	16,279	18,534	22,653	26,674	250
Хлор	Cl ₂	1,34	1,32	—	—	3,214	2,995	11,376	12,552	14,710	16,867	20,986	25,105	531
Этан	C ₂ H ₆	1,20	1,12	1,09	1,08	1,356	1,263	7,747	8,630	10,003	11,376	14,024	16,475	—
Этилен	C ₂ H ₄	1,24	1,16	1,12	1,10	1,260	1,174	8,336	9,512	11,278	12,847	15,789	18,240	226

Таблица П.5

Плотность насыщенного водяного пара, $\text{кг/м}^3 \cdot 10^2$

$t, ^\circ\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,4847	0,5189	0,5555	0,5943	0,6357	0,6793	0,7250	0,7746	0,8263	0,8813
10	0,9398	1,001	1,065	1,134	1,206	1,282	1,363	1,447	1,536	1,630
20	1,729	1,835	1,942	2,057	2,177	2,304	2,437	2,576	2,722	2,875
30	3,036	3,205	3,381	3,565	3,758	3,960	4,172	4,393	4,623	4,864
40	5,115	5,376	5,649	5,935	6,234	6,545	6,658	7,205	7,567	7,923
50	8,302	8,696	9,107	9,535	9,980	10,44	10,92	11,42	11,93	12,47
60	13,02	13,80	14,20	14,82	15,45	16,13	16,82	17,53	18,27	19,03
70	19,82	20,64	21,48	22,36	23,20	24,20	25,16	26,15	27,18	28,24

Таблица П.6

Давление насыщенного водяного пара, кПа

$t, ^\circ\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,6220	0,6694	0,7198	0,7723	0,8289	0,8890	0,9530	1,0210	1,0932	1,1399
10	1,2513	1,5376	1,4291	1,5261	1,6289	1,7376	1,8527	1,9745	2,103	2,239
20	2,383	2,534	2,694	2,863	3,041	3,229	3,426	3,534	3,653	4,003
30	4,325	4,580	4,847	5,128	5,423	5,733	6,057	6,398	6,755	7,129
40	7,520	7,930	8,36	8,809	9,279	9,774	10,284	10,821	11,382	11,967
50	12,578	13,216	13,851	14,575	15,296	16,051	16,835	17,653	18,504	19,39
60	20,51	21,27	22,27	23,30	24,38	25,5	26,66	27,67	29,12	30,42
70	31,77	33,17	34,63	35,13	37,69	39,31	40,98	42,72	44,51	46,37

Таблица П.7

Плотность воды, кг/м³, в зависимости от температуры и давления
 ($p = 1 \dots 200$ кгс/см², $t = 0 \dots 132$ °C)

$t, ^\circ\text{C}$	Давление, кгс/см ²							
	1	20	50	80	100	130	160	200
0	999,8	1000,8	1002,2	1003,7	1004,6	1006,1	1007,6	1009,5
10	999,8	1000,7	1002,0	1003,4	1004,3	1005,7	1007,0	1008,9
20	998,3	999,2	1000,5	1001,8	1002,7	1003,4	1005,3	1007,0
30	995,7	996,6	997,9	999,2	1000,0	1001,3	1002,6	1004,2
40	992,3	993,1	994,4	995,6	996,5	997,8	999,0	1000,0
50	988,0	988,9	990,2	991,5	992,3	993,5	994,8	996,4
65	985,7	986,8	987,8	989,1	990,0	991,2	992,4	994,1
60	983,2	984,1	985,3	986,6	987,5	988,7	989,9	991,6
65	980,5	981,4	982,6	984,0	984,8	986,1	987,3	989,0
70	977,7	978,6	979,8	981,2	982,0	983,3	984,5	986,2
75	974,7	975,6	976,9	978,2	979,1	980,3	981,7	983,4
80	971,6	972,5	973,9	975,1	976,1	977,3	978,7	980,4
85	968,4	969,3	970,7	972,0	972,9	974,2	975,6	977,3
90	965,2	966,0	967,4	968,7	969,6	971,0	972,3	974,0
95	—	962,6	964,0	965,3	966,2	967,6	968,9	970,6
100	—	950,0	960,4	961,8	962,7	964,1	965,4	967,2
102	—	957,5	958,9	960,3	961,3	962,6	964,0	965,8
101	—	956,0	957,4	958,9	959,9	961,2	962,5	964,4
106	—	954,6	956,0	957,4	958,5	959,7	961,1	962,9
108	—	953,1	954,5	956,0	957,0	958,3	959,6	961,5
110	—	951,6	953,0	954,5	955,5	956,8	958,2	960,1
112	—	950,1	951,5	952,9	954,0	955,3	956,7	958,6
114	—	948,6	950,0	951,4	952,4	953,7	955,2	957,1
116	—	947,0	948,4	949,8	950,9	952,2	953,6	955,6
118	—	945,4	946,9	948,3	949,3	950,6	952,1	954,1
120	—	943,8	945,3	946,7	947,7	949,1	950,6	952,6
122	—	942,1	943,7	945,1	946,1	947,5	949,0	951,0
124	—	940,5	942,0	943,5	944,5	945,9	947,4	949,4
126	—	938,8	940,4	941,8	942,9	944,3	945,8	947,8
128	—	937,1	938,7	940,2	941,3	942,7	944,2	946,2
130	—	935,4	937,0	938,6	939,6	941,1	942,6	944,6
132	—	933,7	935,3	936,9	937,9	939,4	940,9	942,9

Таблица П.8

Плотность воды, кг/м^3 , в зависимости от температуры и давления
 ($p = 1 \dots 400 \text{ кгс/см}^2$, $t = 134 \dots 270 \text{ }^\circ\text{C}$)

$t, ^\circ\text{C}$	Давление, кгс/см^2												
	1	20	50	80	100	130	160	200	240	280	320	360	400
134	—	932,0	933,6	935,2	936,2	937,7	939,2	941,2	—	—	—	—	—
136	—	930,3	931,9	933,4	934,5	936,1	937,6	939,6	—	—	—	—	—
138	—	928,6	930,1	931,7	932,8	934,4	935,9	937,9	—	—	—	—	—
140	—	926,8	928,4	930,0	931,3	932,7	934,2	936,2	—	—	—	—	—
142	—	925,0	926,7	928,2	929,4	930,9	932,4	934,5	—	—	—	—	—
144	—	923,2	924,9	926,4	927,6	929,2	930,7	932,8	—	—	—	—	—
146	—	921,3	923,1	924,6	925,8	927,4	928,9	931,0	—	—	—	—	—
148	—	919,5	921,3	922,8	924,0	925,6	927,2	929,3	—	—	—	—	—
150	—	917,6	919,4	921,0	922,2	923,8	925,4	927,6	929,6	931,7	933,7	935,7	937,6
152	—	915,7	917,5	919,1	920,4	922,0	923,6	925,8	927,8	930,0	932,0	934,0	935,9
154	—	913,9	915,6	917,3	918,5	920,1	921,7	923,9	926,0	928,2	930,2	932,3	934,2
156	—	912,0	913,7	915,4	916,6	918,3	919,9	922,1	924,2	926,4	928,5	930,5	932,5
158	—	910,0	911,7	913,0	914,7	916,4	918,0	920,2	922,4	924,6	926,7	928,8	930,8
160	—	908,1	909,8	911,7	912,8	914,5	916,2	918,4	920,6	922,8	924,9	927,0	929,0
162	—	906,2	907,9	909,7	910,9	912,6	914,3	916,5	918,7	921,0	923,1	925,2	927,2
164	—	904,2	905,9	907,7	908,9	910,7	912,4	914,6	916,9	919,1	921,3	923,4	925,4
166	—	902,2	903,9	905,8	907,0	908,7	910,4	912,7	915,0	917,3	919,4	921,6	923,6
168	—	900,2	901,9	903,8	905,0	906,8	908,5	910,3	913,1	915,4	917,6	919,8	921,8
170	—	898,1	899,0	901,8	903,0	904,8	906,6	908,9	911,2	913,5	915,7	917,9	920,0
172	—	896,0	897,9	899,8	901,0	902,8	904,6	906,9	909,3	911,6	913,8	916,0	918,2
174	—	893,9	895,8	897,7	899,0	900,8	902,6	904,9	907,4	909,7	911,9	914,1	916,3
176	—	891,8	893,7	895,7	896,9	898,8	900,5	903,0	905,4	907,7	910,0	912,2	914,5
178	—	889,6	891,6	893,6	894,9	896,8	898,5	901,0	903,5	905,8	908,1	910,3	912,6
180	—	887,5	889,5	891,5	892,8	894,7	896,5	899,0	901,5	903,8	906,1	908,4	910,7
182	—	885,4	887,4	889,4	890,7	892,6	894,4	897,0	899,5	901,8	904,1	906,4	908,8
184	—	883,2	885,2	887,2	888,6	890,5	892,3	894,9	897,5	899,8	902,1	904,5	906,8
186	—	881,0	883,1	885,1	886,4	888,4	890,3	892,9	895,4	897,8	900,1	902,5	904,9
188	—	878,8	880,9	882,9	884,3	886,3	888,2	890,8	893,4	895,8	898,1	900,5	902,9
190	—	876,6	878,7	880,7	882,1	884,2	886,1	888,7	891,3	893,7	896,1	898,5	900,9
192	—	874,3	876,5	878,5	879,9	882,0	883,9	886,6	889,2	891,6	894,1	896,5	898,9
194	—	872,0	874,2	876,3	877,7	879,8	881,7	884,5	887,1	889,5	892,0	894,5	896,9
196	—	869,7	871,9	874,1	875,4	877,6	879,6	882,4	884,9	887,4	890,0	892,4	894,9
198	—	867,4	869,6	871,8	873,2	875,4	877,4	880,2	882,8	885,3	887,0	890,1	892,9

$t, ^\circ\text{C}$	Давление, кгс/см ²												
	1	20	50	80	100	130	160	200	240	280	320	360	400
200	—	865,0	867,3	869,5	870,9	873,1	875,2	878,0	880,6	883,2	885,8	888,3	890,8
202	—	862,6	865,0	867,2	868,6	870,8	872,9	875,8	878,4	881,1	883,7	887,2	888,7
204	—	860,2	862,6	864,8	866,3	868,5	870,6	873,5	876,3	878,9	881,5	884,1	886,6
206	—	857,7	860,2	862,4	863,9	866,2	868,4	871,3	874,1	876,7	879,4	882,0	884,5
208	—	855,3	857,8	860,0	861,6	863,9	866,1	869,0	871,8	874,5	877,2	879,9	882,4
210	—	852,9	855,3	857,6	859,2	861,5	863,8	866,7	869,6	872,3	875,0	877,7	880,3
212	—	—	852,8	855,2	856,8	859,1	861,4	864,4	867,3	870,1	872,8	875,5	878,1
214	—	—	850,3	852,7	854,4	856,7	859,0	862,0	865,0	867,9	870,6	873,3	876,0
216	—	—	847,8	850,2	852,0	854,3	856,6	859,7	862,7	865,6	868,4	871,1	873,8
218	—	—	845,3	847,7	849,5	851,9	854,2	857,3	860,4	863,3	866,2	868,9	871,6
220	—	—	842,7	845,2	847,0	849,4	851,8	854,9	858,0	861,0	863,9	866,6	869,4
222	—	—	840,1	842,7	844,5	846,9	849,3	852,5	855,6	858,6	861,6	864,3	867,2
224	—	—	837,5	840,1	841,9	844,4	846,8	850,1	853,2	856,2	859,3	862,0	864,9
226	—	—	834,8	837,5	839,3	841,9	844,3	847,6	850,8	853,8	856,9	859,7	862,7
228	—	—	832,1	834,9	836,7	839,3	841,8	845,1	848,4	851,4	854,6	857,4	860,4
230	—	—	829,4	832,2	834,0	836,7	839,3	842,6	845,9	849,0	852,2	855,1	858,1
232	—	—	826,7	829,5	831,3	834,1	836,7	840,1	833,4	846,6	849,8	852,8	855,8
234	—	—	823,9	826,7	828,6	831,4	834,1	837,5	841,0	844,2	847,4	850,4	853,4
236	—	—	821,1	823,9	825,9	828,7	831,4	834,9	838,4	841,7	844,9	848,0	851,1
238	—	—	818,2	821,1	823,1	825,9	828,7	832,3	835,9	839,2	842,5	845,6	848,7
240	—	—	815,3	818,3	820,3	823,2	826,0	829,7	833,3	836,7	840,0	843,2	846,3
242	—	—	812,4	815,5	817,5	820,5	823,3	827,0	830,7	834,1	837,5	840,7	843,9
244	—	—	809,4	812,0	814,7	817,7	820,5	824,3	828,0	831,6	835,0	838,3	841,5
246	—	—	806,4	809,7	811,8	814,9	817,8	821,6	825,3	829,0	832,5	835,8	839,0
248	—	—	803,4	806,7	808,9	812,0	815,0	818,9	821,6	826,3	829,9	833,2	836,5
250	—	—	800,3	803,7	805,9	809,1	812,1	816,1	819,9	823,7	827,3	830,7	834,0
252	—	—	797,2	800,7	802,9	806,2	809,2	813,3	817,2	821,0	824,7	828,2	831,5
254	—	—	794,0	797,6	799,8	803,2	806,3	810,5	814,4	818,3	822,0	825,6	829,0
256	—	—	790,8	794,4	796,7	800,2	803,4	807,6	811,7	815,6	819,3	823,0	826,5
258	—	—	787,5	791,2	793,6	797,1	800,4	804,7	808,9	812,8	816,6	820,4	823,9
260	—	—	784,2	788,0	790,4	794,0	797,4	801,8	806,0	810,0	813,9	817,7	821,3
262	—	—	—	784,7	787,2	790,9	794,3	798,8	803,1	807,2	811,2	815,0	818,7
264	—	—	—	781,4	784,0	787,7	791,2	795,8	800,2	804,4	808,4	812,3	816,0
266	—	—	—	778,0	780,7	784,5	788,1	792,8	797,3	801,5	805,6	809,6	813,3
268	—	—	—	774,6	777,3	781,2	784,9	789,7	794,3	798,6	802,8	806,8	810,6
270	—	—	—	771,1	773,9	777,9	781,7	786,6	791,2	795,7	799,9	804,0	807,9

Таблица П.9

Плотность воды, кг/м³, в зависимости от температуры и давления
($p = 1 \dots 200$ кгс/см², $t = 272 \dots 360$ °C)

$t, ^\circ\text{C}$	Давление, кгс/см ²							
	1	20	50	80	100	130	160	200
272	—	—	—	767,6	770,5	774,6	778,4	783,4
274	—	—	—	764,0	767,0	771,2	775,1	780,2
276	—	—	—	760,4	763,4	767,7	771,8	777,0
278	—	—	—	756,7	759,8	764,2	768,4	773,7
280	—	—	—	752,9	756,1	760,6	764,9	770,4
282	—	—	—	749,0	752,4	757,0	761,4	767,1
284	—	—	—	745,1	748,6	753,3	757,8	763,7
286	—	—	—	741,1	744,7	749,5	754,2	760,2
288	—	—	—	737,0	740,7	745,7	750,5	756,7
290	—	—	—	732,9	736,6	741,8	746,8	753,1
292	—	—	—	—	732,4	737,9	743,0	749,5
294	—	—	—	—	728,2	733,8	739,2	745,8
296	—	—	—	—	723,8	729,7	735,2	742,0
298	—	—	—	—	719,4	725,5	731,2	738,2
300	—	—	—	—	714,9	721,2	727,1	734,3
301	—	—	—	—	—	719,1	725,0	732,4
302	—	—	—	—	—	716,9	722,9	730,4
303	—	—	—	—	—	714,7	720,8	728,4
304	—	—	—	—	—	712,4	718,7	726,4
305	—	—	—	—	—	710,1	710,5	724,4
306	—	—	—	—	—	707,8	714,3	722,3
307	—	—	—	—	—	705,5	712,1	720,2
308	—	—	—	—	—	703,1	709,8	718,1
309	—	—	—	—	—	700,7	707,5	716,0
310	—	—	—	—	—	698,2	705,2	713,8
311	—	—	—	—	—	695,7	702,9	711,7
312	—	—	—	—	—	693,2	700,6	709,5
313	—	—	—	—	—	690,6	698,2	707,3
314	—	—	—	—	—	688,0	695,8	705,0
315	—	—	—	—	—	685,4	693,4	702,8
316	—	—	—	—	—	682,7	690,9	700,5
317	—	—	—	—	—	680,0	688,4	698,2
318	—	—	—	—	—	677,3	685,8	695,8
319	—	—	—	—	—	674,5	683,2	693,4

$t, ^\circ\text{C}$	Давление, кгс/см ²							
	1	20	50	80	100	130	160	200
320	—	—	—	—	—	671,7	680,6	691,0
321	—	—	—	—	—	—	678,0	688,6
322	—	—	—	—	—	—	675,4	686,2
323	—	—	—	—	—	—	672,7	683,7
324	—	—	—	—	—	—	669,9	681,2
325	—	—	—	—	—	—	667,1	678,7
326	—	—	—	—	—	—	664,2	676,1
327	—	—	—	—	—	—	661,2	673,5
328	—	—	—	—	—	—	658,2	670,9
329	—	—	—	—	—	—	655,1	668,1
330	—	—	—	—	—	—	651,9	665,3
331	—	—	—	—	—	—	648,6	662,6
332	—	—	—	—	—	—	645,3	659,8
333	—	—	—	—	—	—	642,0	657,0
334	—	—	—	—	—	—	638,6	654,1
335	—	—	—	—	—	—	635,1	651,1
336	—	—	—	—	—	—	631,5	648,1
337	—	—	—	—	—	—	627,9	645,0
338	—	—	—	—	—	—	624,2	641,8
339	—	—	—	—	—	—	620,4	638,5
340	—	—	—	—	—	—	616,6	635,2
341	—	—	—	—	—	—	—	632,2
342	—	—	—	—	—	—	—	629,2
343	—	—	—	—	—	—	—	626,0
344	—	—	—	—	—	—	—	622,5
345	—	—	—	—	—	—	—	618,8
346	—	—	—	—	—	—	—	615,0
347	—	—	—	—	—	—	—	611,0
348	—	—	—	—	—	—	—	606,9
349	—	—	—	—	—	—	—	602,6
350	—	—	—	—	—	—	—	598,1
351	—	—	—	—	—	—	—	593,4
352	—	—	—	—	—	—	—	588,6
353	—	—	—	—	—	—	—	583,6
354	—	—	—	—	—	—	—	578,4
355	—	—	—	—	—	—	—	573,0

$t, ^\circ\text{C}$	Давление, кгс/см ²							
	1	20	50	80	100	130	160	200
356	—	—	—	—	—	—	—	567,4
357	—	—	—	—	—	—	—	561,7
358	—	—	—	—	—	—	—	555,8
359	—	—	—	—	—	—	—	549,7
360	—	—	—	—	—	—	—	543,5

Таблица П.10

Плотность водяного пара, кг/м³ ($p = 1 \dots 13$ кгс/см², $t = 100 \dots 160$ °C),
параметры на линии насыщения

$p,$ кгс/см ²	$t_{\text{нас}}, ^\circ\text{C}$	$t, ^\circ\text{C}$						
		100	110	120	130	140	150	160
1,0	99,09	0,5779	0,5618	0,5467	0,5325	0,5190	0,5063	0,4942
1,1	101,76	—	0,6188	0,6020	0,5865	0,5714	0,5574	0,5441
1,2	104,25	—	0,6761	0,6575	0,6402	0,6242	0,6086	0,5938
1,3	100,56	—	0,7331	0,7133	0,6944	0,6766	0,6596	0,6439
1,4	108,74	—	0,7911	0,7692	0,7485	0,7294	0,7112	0,6940
1,5	110,79	—	—	0,8251	0,8032	0,7825	0,7628	0,7440
1,6	112,73	—	—	0,8810	0,8576	0,8354	0,8143	0,7943
1,7	114,57	—	—	0,9372	0,9124	0,8881	0,8658	0,8446
1,8	116,33	—	—	0,9938	0,9668	0,9416	0,9174	0,8952
1,9	118,01	—	—	1,0504	1,0216	0,9947	0,9695	0,9452
2,0	119,62	—	—	1,107	1,077	1,0481	1,021	0,9960
2,1	121,16	—	—	—	1,132	1,102	1,073	1,047
2,2	122,64	—	—	—	1,187	1,155	1,125	1,097
2,3	124,07	—	—	—	1,242	1,209	1,178	1,148
2,4	125,46	—	—	—	1,298	1,263	1,230	1,199
2,5	126,79	—	—	—	1,354	1,317	1,282	1,250
2,6	128,08	—	—	—	1,409	1,371	1,335	1,301
2,7	129,33	—	—	—	1,465	1,425	1,388	1,352
2,8	130,55	—	—	—	—	1,480	1,440	1,404
2,9	131,73	—	—	—	—	1,534	1,493	1,455
3,0	132,88	—	—	—	—	1,588	1,546	1,506
3,2	135,08	—	—	—	—	1,698	1,652	1,609
3,4	137,18	—	—	—	—	1,808	1,759	1,713
3,6	139,18	—	—	—	—	1,919	1,866	1,816
3,8	141,09	—	—	—	—	—	1,973	1,921
4,0	142,92	—	—	—	—	—	2,081	2,025

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		100	110	120	130	140	150	160
4,2	144,68	—	—	—	—	—	2,190	2,130
4,4	146,38	—	—	—	—	—	2,298	2,236
4,6	148,01	—	—	—	—	—	2,408	2,341
4,8	149,59	—	—	—	—	—	2,518	2,447
5,0	151,11	—	—	—	—	—	—	2,554
5,5	154,72	—	—	—	—	—	—	2,822
6,0	158,08	—	—	—	—	—	—	3,094
6,5	161,22	—	—	—	—	—	—	—
7,0	164,17	—	—	—	—	—	—	—
7,5	166,96	—	—	—	—	—	—	—
8,0	169,61	—	—	—	—	—	—	—
8,5	172,12	—	—	—	—	—	—	—
9,0	174,53	—	—	—	—	—	—	—
9,5	176,83	—	—	—	—	—	—	—
10,0	179,04	—	—	—	—	—	—	—
11	183,20	—	—	—	—	—	—	—
12	187,08	—	—	—	—	—	—	—
13	190,71	—	—	—	—	—	—	—

Таблица П.11

Плотность водяного пара, кг/м³ ($p = 1 \dots 13$ кгс/см², $t = 170 \dots 230$ °C)

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		170	180	190	200	210	220	230
1,0	—	0,4827	0,4718	0,4613	0,4514	0,4418	0,4327	0,4240
1,1	—	0,5313	0,5192	0,5079	0,4968	0,4864	0,4762	0,4666
1,2	—	0,5800	0,5669	0,5543	0,5423	0,5308	0,5198	0,5092
1,3	—	0,6289	0,6146	0,6006	0,5875	0,5754	0,5634	0,5519
1,4	—	0,6775	0,6622	0,6472	0,6333	0,6196	0,6068	0,5945
1,5	—	0,7267	0,7097	0,6940	0,6788	0,6644	0,6506	0,6373
1,6	—	0,7758	0,7576	0,7407	0,7246	0,7092	0,6940	0,6798
1,7	—	0,8244	0,8058	0,7874	0,7704	0,7536	0,7380	0,7225
1,8	—	0,8734	0,8532	0,8340	0,8157	0,7981	0,7819	0,7657
1,9	—	0,9225	0,9017	0,8810	0,8613	0,8432	0,8251	0,8084
2,0	—	0,9725	0,9497	0,9276	0,9074	0,8881	0,8686	0,8511
2,1	—	1,0214	0,9976	0,9749	0,9533	0,9328	0,9132	0,8944
2,2	—	1,071	1,046	1,022	0,9993	0,9776	0,9570	0,9372
2,3	—	1,120	1,094	1,069	1,045	1,023	1,001	0,9803

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		170	180	190	200	210	220	230
2,4	—	1,170	1,142	1,116	1,091	1,068	1,045	1,023
2,5	—	1,220	1,191	1,163	1,137	1,113	1,089	1,066
2,6	—	1,269	1,239	1,210	1,183	1,158	1,133	1,110
2,7	—	1,319	1,288	1,258	1,230	1,203	1,177	1,153
2,8	—	1,369	1,336	1,305	1,276	1,248	1,221	1,166
2,9	—	1,419	1,385	1,353	1,322	1,293	1,266	1,239
3,0	—	1,469	1,433	1,400	1,369	1,338	1,310	1,282
3,2	—	1,569	1,531	1,495	1,461	1,429	1,398	1,369
3,4	—	1,670	1,629	1,591	1,554	1,520	1,487	1,456
3,6	—	1,770	1,727	1,686	1,647	1,611	1,576	1,542
3,8	—	1,872	1,825	1,782	1,741	1,702	1,665	1,630
4,0	—	1,973	1,924	1,878	1,834	1,793	1,754	1,717
4,2	—	2,075	2,023	1,975	1,629	1,885	1,844	1,804
4,4	—	2,177	2,123	2,071	2,023	1,977	1,933	1,892
4,6	—	2,280	2,222	2,168	2,117	2,069	2,023	1,979
4,8	—	2,383	2,322	2,265	2,211	2,161	2,113	2,067
5,0	—	2,486	2,422	2,362	2,366	2,253	2,203	2,155
5,5	—	2,746	2,674	2,607	2,544	2,485	2,429	2,376
6,0	—	3,008	2,927	2,853	2,783	2,718	2,656	2,597
6,5	—	3,272	3,184	3,102	3,025	2,952	2,884	2,820
7,0	—	3,539	3,441	3,351	3,267	3,188	3,113	3,043
7,5	—	3,808	3,701	3,602	3,511	3,425	3,344	3,268
8,0	—	4,080	3,964	3,856	3,757	3,663	3,576	3,494
8,5	—	—	4,228	4,112	4,003	3,903	3,810	3,720
9,0	—	—	4,494	4,369	4,252	4,144	4,044	3,949
8,5	—	—	4,764	4,627	4,502	4,388	4,279	4,177
10,0	—	—	5,038	4,890	4,755	4,632	4,517	4,407
11	—	—	—	5,420	5,266	5,126	4,995	4,871
12	—	—	—	5,959	5,784	5,624	5,476	5,342
13	—	—	—	—	6,313	6,131	5,967	5,814

Таблица П.12

Плотность водяного пара, кг/м³ ($p = 1 \dots 13$ кгс/см², $t = 245 \dots 300$ °C)

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		245	250	260	270	280	290	300
1,0	—	0,4156	0,4075	0,3998	0,3923	0,3852	0,3784	0,3716
1,1	—	0,4572	0,4484	0,4399	0,4318	0,4239	0,4161	0,4088

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		245	250	260	270	280	290	300
1,2	—	0,4990	0,4895	0,4801	0,4710	0,4625	0,4541	0,4462
1,3	—	0,5408	0,5302	0,5203	0,5105	0,5012	0,4921	0,4836
1,4	—	0,5828	0,5714	0,5605	0,5501	0,5400	0,5302	0,5208
1,5	—	0,6246	0,6124	0,6006	0,5893	0,5787	0,5682	0,5580
1,6	—	0,6667	0,6536	0,6410	0,6289	0,6173	0,6061	0,5956
1,7	—	0,7082	0,6944	0,6812	0,6684	0,6562	0,6443	0,6329
1,8	—	0,7502	0,7358	0,7215	0,7077	0,6949	0,6821	0,6702
1,9	—	0,7924	0,7770	0,7616	0,7474	0,7337	0,7205	0,7077
2,0	—	0,8340	0,8177	0,8019	0,7874	0,7728	0,7587	0,7452
2,1	—	0,8764	0,8591	0,8425	0,8264	0,8117	0,7968	0,7825
2,2	—	0,9183	0,9001	0,8834	0,8666	0,8503	0,8347	0,8197
2,3	—	0,9605	0,9416	0,9231	0,9058	0,8889	0,8726	0,8576
2,4	—	1,003	0,9828	0,9639	0,9452	0,9276	0,9107	0,8953
2,5	—	1,015	1,024	1,004	0,9853	0,9669	0,9497	0,9328
2,6	—	1,087	1,065	1,015	1,025	1,006	0,9876	0,9699
2,7	—	1,129	1,107	1,085	1,065	1,045	1,026	1,007
2,8	—	1,172	1,148	1,126	1,104	1,084	1,064	1,045
2,9	—	1,214	1,190	1,166	1,144	1,123	1,102	1,083
3,0	—	1,256	1,231	1,207	1,184	1,162	1,141	1,120
3,2	—	1,341	1,314	1,288	1,264	1,240	1,217	1,195
3,4	—	1,426	1,397	1,370	1,344	1,318	1,294	1,271
3,6	—	1,511	1,480	1,451	1,423	1,397	1,371	1,346
3,8	—	1,596	1,564	1,533	1,504	1,475	1,448	1,422
4,0	—	1,681	1,647	1,615	1,584	1,554	1,525	1,497
4,2	—	1,767	1,731	1,697	1,664	1,632	1,602	1,573
4,4	—	1,852	1,815	1,778	1,744	1,711	1,679	1,648
4,6	—	1,938	1,898	1,860	1,824	1,790	1,756	1,724
4,8	—	2,024	1,983	1,943	1,905	1,868	1,834	1,800
5,0	—	2,110	2,066	2,025	1,985	1,947	1,911	1,876
5,5	—	2,326	2,277	2,231	2,187	2,145	2,105	2,066
6,0	—	2,542	2,489	2,438	2,390	2,344	2,299	2,257
6,5	—	2,759	2,701	2,646	2,593	2,543	2,494	2,447
7,0	—	2,977	2,914	2,854	2,797	2,742	2,690	2,640
7,5	—	3,195	3,128	3,063	3,001	2,942	2,886	2,832
8,0	—	3,416	3,343	3,273	3,206	3,143	3,083	3,024

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		245	250	260	270	280	290	300
8,5	—	3,638	3,559	3,484	3,413	3,344	3,280	3,218
9,0	—	3,860	3,775	3,695	3,619	3,516	3,477	3,411
9,5	—	4,082	3,992	3,908	3,826	3,750	3,675	3,605
10,0	—	4,307	4,210	4,120	4,034	3,953	3,874	3,799
11	—	4,757	4,649	4,548	4,452	4,361	4,274	4,191
12	—	5,214	5,092	4,980	4,873	4,771	4,675	4,583
13	—	5,672	5,540	5,414	5,297	5,184	5,079	4,978

Таблица П.13

Плотность водяного пара, кг/м³ ($p = 1 \dots 13$ кгс/см², $t = 310 \dots 370$ °C)

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		310	320	330	340	350	360	370
1,0	—	0,3652	0,3589	0,3530	0,3472	0,3415	0,3361	0,3309
1,1	—	0,4018	0,3949	0,3884	0,3820	0,3758	0,3698	0,3640
1,2	—	0,4384	0,4310	0,4237	0,4168	0,4100	0,4036	0,3972
1,3	—	0,4751	0,4671	0,4591	0,4517	0,4442	0,4372	0,4303
1,4	—	0,5118	0,5030	0,4946	0,4864	0,4785	0,4708	0,4636
1,5	—	0,5485	0,5391	0,5299	0,5214	0,5128	0,5045	0,4968
1,6	—	0,5851	0,5750	0,5656	0,5562	0,5470	0,5385	0,5299
1,7	—	0,6219	0,6112	0,6010	0,5910	0,5814	0,5721	0,5631
1,8	—	0,6588	0,6472	0,6365	0,6258	0,6158	0,6061	0,5963
1,9	—	0,6954	0,6835	0,6720	0,6609	0,6502	0,6398	0,6297
2,0	—	0,7321	0,7194	0,7072	0,6959	0,6845	0,6734	0,6627
2,1	—	0,7686	0,7559	0,7429	0,7305	0,7189	0,7072	0,6959
2,2	—	0,8058	0,7918	0,7782	0,7657	0,7530	0,7407	0,7294
2,3	—	0,8425	0,8278	0,8143	0,8006	0,7874	0,7746	0,7628
2,4	—	0,8795	0,8643	0,8496	0,8354	0,8217	0,8084	0,7962
2,5	—	0,9158	0,9001	0,8850	0,8703	0,8562	0,8425	0,8292
2,6	—	0,9533	0,9363	0,9208	0,9058	0,8905	0,8761	0,8628
2,7	—	0,9898	0,9728	0,9560	0,9407	0,9251	0,9099	0,8961
2,8	—	1,027	1,009	0,9919	0,9754	0,9597	0,9443	0,9294
2,9	—	1,064	1,045	1,028	1,010	0,9938	0,9779	0,9625
3,0	—	1,100	1,082	1,063	1,045	1,028	1,012	0,9957
3,2	—	1,174	1,154	1,134	1,116	1,097	1,080	1,062
3,4	—	1,248	1,227	1,206	1,186	1,166	1,147	1,129
3,6	—	1,322	1,299	1,277	1,256	1,235	1,215	1,196
3,8	—	1,396	1,372	1,349	1,326	1,304	1,283	1,263
4,0	—	1,471	1,445	1,420	1,396	1,373	1,351	1,330

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		310	320	330	340	350	360	370
4,2	—	1,545	1,518	1,492	1,467	1,443	1,419	1,397
4,4	—	1,619	1,591	1,564	1,537	1,512	1,487	1,463
4,6	—	1,693	1,664	1,635	1,608	1,581	1,555	1,531
4,8	—	1,768	1,737	1,707	1,678	1,650	1,624	1,598
5,0	—	1,843	1,810	1,779	1,749	1,720	1,692	1,665
5,5	—	2,020	1,993	1,959	1,926	1,894	1,862	1,832
6,0	—	2,216	2,177	2,139	2,103	2,067	2,033	2,001
6,5	—	2,404	2,361	2,320	2,280	2,242	2,205	2,169
7,0	—	2,591	2,545	2,501	2,458	2,417	2,376	2,338
7,5	—	2,780	2,730	2,682	2,636	2,591	2,548	2,507
8,0	—	2,968	2,915	2,864	2,814	2,766	2,720	2,676
8,5	—	3,158	3,101	3,046	2,993	2,942	2,893	2,846
9,0	—	3,348	3,286	3,228	3,172	3,118	3,066	3,016
9,5	—	3,537	3,473	3,411	3,351	3,294	3,238	3,186
10,0	—	3,729	3,660	3,594	3,531	3,471	3,412	3,356
11	—	4,112	4,036	3,962	3,893	3,824	3,759	3,697
12	—	4,496	4,411	4,331	4,254	4,181	4,108	4,040
13	—	4,883	4,789	4,701	4,617	4,537	4,458	4,384

Таблица П.14

Плотность водяного пара, кг/м³ ($p = 1 \dots 13$ кгс/см², $t = 380 \dots 440$ °C)

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		380	390	400	410	420	430	440
1,0	—	0,3258	0,3208	0,3161	—	—	—	—
1,1	—	0,3584	0,3530	0,3477	—	—	—	—
1,2	—	0,3911	0,3852	0,3794	—	—	—	—
1,8	—	0,4237	0,4174	0,4110	—	—	—	—
1,4	—	0,4564	0,4494	0,4427	—	—	—	—
1,5	—	0,4890	0,4817	0,4744	—	—	—	—
1,6	—	0,5290	0,5139	0,5061	—	—	—	—
1,7	—	0,5543	0,5461	0,5379	—	—	—	—
1,8	—	0,5872	0,5780	0,5695	—	—	—	—
1,9	—	0,6200	0,6105	0,6013	—	—	—	—
2,0	—	0,6527	0,6427	0,6329	—	—	—	—
2,1	—	0,6854	0,6748	0,6649	—	—	—	—
2,2	—	0,7179	0,7072	0,6964	—	—	—	—
2,3	—	0,7508	0,7391	0,7283	—	—	—	—
2,4	—	0,7837	0,7716	0,7599	—	—	—	—

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		380	390	400	410	420	430	440
2,5	—	0,8163	0,8039	0,7918	—	—	—	—
2,6	—	0,8489	0,8361	0,8237	—	—	—	—
2,7	—	0,8818	0,8681	0,8554	—	—	—	—
2,8	—	0,9149	0,9009	0,8873	—	—	—	—
2,9	—	0,9470	0,9328	0,9191	—	—	—	—
3,0	—	0,9802	0,9652	0,9507	—	—	—	—
3,2	—	1,046	1,030	1,014	—	—	—	—
3,4	—	1,112	1,095	1,078	—	—	—	—
3,6	—	1,177	1,159	1,142	—	—	—	—
3,8	—	1,243	1,224	1,205	—	—	—	—
4,0	—	1,309	1,289	1,269	—	—	—	—
4,2	—	1,375	1,354	1,333	—	—	—	—
4,4	—	1,440	1,418	1,397	—	—	—	—
4,6	—	1,506	1,483	1,461	—	—	—	—
4,8	—	1,573	1,548	1,525	—	—	—	—
5,0	—	1,638	1,613	1,589	—	—	—	—
5,5	—	1,804	1,776	1,749	1,722	1,697	1,672	1,648
6,0	—	1,969	1,938	1,909	1,880	1,852	1,825	1,799
6,5	—	2,135	2,101	2,069	2,038	2,008	1,978	1,950
7,0	—	2,300	2,264	2,230	2,196	2,164	2,132	2,101
7,5	—	2,467	2,428	2,391	2,355	2,319	2,285	2,252
8,0	—	2,633	2,592	2,552	2,513	2,475	2,439	2,404
8,5	—	2,800	2,756	2,713	2,672	2,632	2,593	2,555
8,0	—	2,966	2,920	2,874	2,830	2,788	2,747	2,707
9,5	—	3,134	3,084	3,036	2,990	2,945	2,901	2,859
10,0	—	3,301	3,249	3,198	3,149	3,102	3,055	3,011
11	—	3,636	3,579	3,522	3,469	3,415	3,365	3,316
12	—	3,973	3,909	3,848	3,788	3,731	3,675	3,621
13	—	4,310	4,241	4,174	4,110	4,047	3,986	3,926

Таблица П.15

Плотность водяного пара, кг/м³ ($p = 1 \dots 13$ кгс/см², $t = 450 \dots 510$ °C)

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		450	460	470	480	490	500	510
1,0	—	—	—	—	—	—	—	—
5,0	—	—	—	—	—	—	—	—
5,5	—	1,625	1,602	1,580	1,559	1,538	1,518	—

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		450	460	470	480	490	500	510
6,0	—	1,774	1,749	1,725	1,701	1,679	1,657	—
6,5	—	1,922	1,895	1,869	1,844	1,819	1,795	—
7,0	—	2,071	2,042	2,014	1,986	1,960	1,934	—
7,5	—	2,220	2,189	2,159	2,129	2,101	2,073	—
8,0	—	2,370	2,336	2,304	2,272	2,242	2,212	—
8,5	—	2,519	2,483	2,449	2,415	2,383	2,351	—
9,0	—	2,668	2,631	2,594	2,559	2,524	2,491	—
9,5	—	2,818	2,778	2,740	2,702	2,665	2,630	—
10,0	—	2,967	2,926	2,885	2,846	2,807	2,769	—
11	—	3,268	3,222	3,177	3,133	3,090	3,049	—
12	—	3,569	3,517	3,469	3,420	3,374	3,329	—
13	—	3,870	3,814	3,761	3,709	3,658	3,609	—

Таблица П.16

Плотность водяного пара, кг/м³ ($p = 14 \dots 64$ кгс/см², $t = 190 \dots 250$ °C),
параметры на линии насыщения

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		190	200	210	220	230	240	250
14	194,13	—	6,845	6,644	6,460	6,293	6,135	5,992
15	197,36	—	7,391	7,168	6,964	6,775	6,605	6,443
16	200,43	—	—	7,698	7,474	7,267	7,077	6,901
17	203,35	—	—	8,237	7,987	7,764	7,559	7,364
18	206,14	—	—	8,780	8,511	8,261	8,039	7,837
19	208,82	—	—	9,337	9,042	8,772	8,532	8,306
20	211,38	—	—	—	9,578	9,285	9,025	8,780
21	213,85	—	—	—	10,13	9,810	9,524	9,268
22	216,23	—	—	—	10,68	10,34	10,03	9,750
23	218,53	—	—	—	11,25	10,88	10,54	10,24
24	220,75	—	—	—	—	11,42	11,06	10,74
25	222,90	—	—	—	—	11,97	11,59	11,24
26	224,99	—	—	—	—	12,53	12,12	11,75
27	227,01	—	—	—	—	13,11	12,66	12,26
28	228,98	—	—	—	—	13,69	13,21	12,79
29	230,89	—	—	—	—	—	13,77	13,31
30	232,76	—	—	—	—	—	14,33	13,85
31	234,57	—	—	—	—	—	14,90	14,39
32	236,34	—	—	—	—	—	15,49	14,94
33	238,07	—	—	—	—	—	16,08	15,49

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		190	200	210	220	230	240	250
34	239,76	—	—	—	—	—	16,68	16,06
35	241,42	—	—	—	—	—	—	16,63
36	243,04	—	—	—	—	—	—	17,21
37	244,62	—	—	—	—	—	—	17,81
33	246,17	—	—	—	—	—	—	18,41
39	247,69	—	—	—	—	—	—	19,02
40	249,18	—	—	—	—	—	—	19,64
41	250,64	—	—	—	—	—	—	—
42	252,07	—	—	—	—	—	—	—
43	253,48	—	—	—	—	—	—	—
44	254,87	—	—	—	—	—	—	—
45	256,23	—	—	—	—	—	—	—
46	257,56	—	—	—	—	—	—	—
47	258,88	—	—	—	—	—	—	—
48	260,17	—	—	—	—	—	—	—
49	261,45	—	—	—	—	—	—	—
50	262,70	—	—	—	—	—	—	—
52	265,15	—	—	—	—	—	—	—
54	267,53	—	—	—	—	—	—	—
56	269,84	—	—	—	—	—	—	—
58	272,10	—	—	—	—	—	—	—
60	274,29	—	—	—	—	—	—	—
62	276,43	—	—	—	—	—	—	—
64	278,51	—	—	—	—	—	—	—

Таблица П.17

Плотность водяного пара, кг/м³ ($p = 14 \dots 64$ кгс/см², $t = 260 \dots 320$ °C)

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		260	270	280	290	300	310	320
14	—	5,851	5,724	5,602	5,485	5,376	5,271	5,171
15	—	6,293	6,151	6,020	5,893	5,774	5,662	5,552
16	—	6,738	6,588	6,443	6,305	6,177	6,053	5,935
17	—	7,189	7,022	6,868	6,720	6,579	6,447	6,321
18	—	7,645	7,463	7,294	7,138	6,988	6,845	6,711
19	—	8,097	7,905	7,728	7,559	7,396	7,241	7,097
20	—	8,562	8,354	8,157	7,974	7,806	7,645	7,491
21	—	9,025	8,803	8,598	8,403	8,217	8,045	7,886
22	—	9,497	9,259	9,033	8,826	8,636	8,453	8,278

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		260	270	280	290	300	310	320
23	—	9,968	9,714	9,479	9,259	9,058	8,857	8,681
24	—	10,45	10,18	9,926	9,694	9,479	9,268	9,074
25	—	10,93	10,64	10,38	10,13	9,903	9,682	9,479
26	—	11,42	11,11	10,83	10,57	10,33	10,10	9,882
27	—	11,91	11,59	11,29	11,01	10,76	10,52	10,29
28	—	12,41	12,07	11,75	11,46	11,19	10,93	10,70
29	—	12,91	12,55	12,21	11,91	11,62	11,36	11,11
30	—	13,42	13,04	12,68	12,36	12,06	11,78	11,52
31	—	13,94	13,53	13,16	12,82	12,50	12,21	11,93
32	—	14,46	14,02	13,64	13,28	12,95	12,64	12,35
33	—	14,98	14,53	14,12	13,74	13,39	13,07	12,77
34	—	15,52	15,04	14,60	14,21	13,84	13,51	13,19
35	—	16,06	15,55	15,09	14,68	14,30	13,95	13,62
36	—	16,61	16,07	15,59	15,15	14,76	14,39	14,05
37	—	17,16	16,59	16,09	15,63	15,22	14,83	14,48
33	—	17,72	17,12	16,59	16,11	15,68	15,28	14,91
39	—	18,29	17,66	17,10	16,60	16,15	15,73	15,34
40	—	18,87	18,20	17,62	17,09	16,62	16,18	15,78
41	—	19,46	18,75	18,14	17,59	17,09	16,64	16,22
42	—	20,05	19,31	18,66	18,09	17,57	17,10	16,67
43	—	20,65	19,87	19,20	18,59	18,05	17,56	17,11
44	—	21,27	20,45	19,74	19,11	18,54	18,03	17,56
45	—	21,89	21,03	20,28	19,62	19,03	18,50	18,01
46	—	22,53	21,61	20,83	20,14	19,53	18,98	18,47
47	—	23,17	22,21	21,39	20,66	20,03	19,45	18,93
48	—	—	22,81	21,95	21,20	20,53	19,93	19,39
49	—	—	23,42	22,52	21,73	21,04	20,42	19,85
50	—	—	24,05	23,09	22,28	21,55	20,91	20,32
52	—	—	25,33	24,28	23,38	22,59	21,90	21,27
54	—	—	26,64	25,48	24,50	23,66	22,90	22,23
56	—	—	28,02	26,73	25,66	24,74	23,93	23,20
58	—	—	—	28,02	26,85	25,85	24,97	24,19
60	—	—	—	29,34	28,06	26,98	26,03	25,20
62	—	—	—	30,72	29,31	28,13	27,11	26,22
64	—	—	—	32,14	30,59	29,31	28,22	27,26

Таблица П.18

Плотность водяного пара, кг/м³ ($p = 14 \dots 64$ кгс/см², $t = 330 \dots 390$ °С)

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °С	t , °С						
		330	340	350	360	370	380	390
14	—	5,074	4,983	4,895	4,810	4,728	4,651	4,575
15	—	5,450	5,350	5,255	5,163	5,074	4,990	4,909
16	—	5,824	5,718	5,615	5,516	5,423	5,330	5,244
17	—	6,203	6,086	5,977	5,872	5,770	5,672	5,580
18	—	6,583	6,460	6,341	6,227	6,120	6,017	5,917
19	—	6,964	6,831	6,707	6,588	6,468	6,361	6,254
20	—	7,342	7,205	7,072	6,944	6,821	6,707	6,592
21	—	7,728	7,582	7,440	7,305	7,174	7,052	6,930
22	—	8,117	7,962	7,812	7,669	7,530	7,396	7,273
23	—	8,503	8,340	8,183	8,032	7,886	7,746	7,616
24	—	8,897	8,718	8,554	8,396	8,244	8,097	7,955
25	—	9,285	9,090	8,929	8,757	8,598	8,446	8,299
26	—	9,679	9,488	9,302	9,124	8,961	8,803	8,650
27	—	10,07	9,872	9,679	9,497	9,320	9,158	8,993
28	—	10,47	10,26	10,06	9,866	9,682	9,506	9,337
29	—	10,87	10,65	10,44	10,24	10,05	9,864	9,689
30	—	11,27	11,04	10,82	10,61	10,41	10,22	10,04
31	—	11,68	11,43	11,20	10,98	10,78	10,58	10,39
32	—	12,08	11,83	11,59	11,36	11,14	10,94	10,74
33	—	12,49	12,22	11,98	11,74	11,51	11,30	11,09
34	—	12,90	12,62	12,36	12,12	11,88	11,66	11,45
35	—	13,31	13,03	12,76	12,50	12,25	12,02	11,80
36	—	13,73	13,43	13,15	12,88	12,63	12,39	12,16
37	—	14,14	13,83	13,54	13,26	13,00	12,75	12,52
38	—	14,56	14,24	13,94	13,65	13,38	13,12	12,87
39	—	14,99	14,65	14,33	14,04	13,76	13,49	13,24
40	—	15,41	15,06	14,73	14,43	14,13	13,86	13,60
41	—	15,84	15,47	15,14	14,81	14,52	14,23	13,96
42	—	16,26	15,89	15,54	15,21	14,90	14,60	14,32
43	—	16,69	16,30	15,94	15,60	15,28	14,98	14,69
44	—	17,13	16,72	16,35	16,00	15,67	15,35	15,05
45	—	17,56	17,15	16,76	16,40	16,05	15,73	15,42
46	—	18,00	17,57	17,17	16,80	16,44	16,11	15,79
47	—	18,45	18,00	17,58	17,19	16,83	16,48	16,16
48	—	18,89	18,43	18,00	17,60	17,22	16,87	16,53

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		330	340	350	360	370	380	390
49	—	19,33	18,86	18,42	18,00	17,61	17,25	16,90
50	—	19,79	19,29	18,84	18,41	18,01	17,63	17,28
52	—	20,70	20,17	19,68	19,23	18,80	18,41	18,03
54	—	21,62	21,05	20,53	20,06	19,60	19,18	18,79
56	—	22,55	21,95	21,40	20,89	20,42	19,97	19,55
58	—	23,50	22,86	22,27	21,73	21,23	20,76	20,32
60	—	24,45	23,78	23,15	22,58	22,06	21,56	21,10
62	—	25,43	24,70	24,05	23,45	22,88	22,36	21,88
64	—	26,41	25,65	24,95	24,31	23,72	23,17	22,66

Таблица П.19

Плотность водяного пара, кг/м³ ($p = 14 \dots 64$ кгс/см², $t = 400 \dots 460$ °C)

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		400	410	420	430	440	450	460
14	—	4,502	4,431	4,363	4,297	4,234	4,172	4,112
15	—	4,829	4,753	4,679	4,608	4,541	4,474	4,409
16	—	5,160	5,076	4,998	4,921	4,850	4,778	4,708
17	—	5,488	5,402	5,316	5,236	5,157	5,081	5,008
18	—	5,821	5,727	5,637	5,549	5,467	5,385	5,308
19	—	6,150	6,053	5,956	5,865	5,777	5,692	5,605
20	—	6,485	6,378	6,277	6,180	6,085	5,995	5,910
21	—	6,817	6,707	6,601	6,498	6,398	6,301	6,211
22	—	7,153	7,037	6,925	6,817	6,711	6,609	6,510
23	—	7,485	7,364	7,246	7,133	7,022	6,916	6,812
24	—	7,825	7,698	7,570	7,452	7,337	7,225	7,117
25	—	8,163	8,026	7,899	7,770	7,651	7,536	7,424
26	—	8,503	8,361	8,224	8,091	7,968	7,843	7,728
27	—	8,842	8,696	8,547	8,410	8,278	8,157	8,032
28	—	9,183	9,025	8,881	8,734	8,598	8,467	8,340
29	—	9,524	9,363	9,208	9,058	8,913	8,780	8,643
30	—	9,864	9,696	9,533	9,381	9,234	9,091	8,953
31	—	10,21	10,03	9,867	9,706	9,551	9,398	9,259
32	—	10,55	10,37	10,20	10,03	9,871	9,715	9,569
33	—	10,90	10,71	10,53	10,36	10,19	10,03	9,875
34	—	11,24	11,05	10,86	10,68	10,51	10,34	10,18
35	—	11,59	11,39	11,20	11,01	10,83	10,66	10,49
36	—	11,94	11,73	11,53	11,34	11,15	10,98	10,81
37	—	12,29	12,07	11,87	11,67	11,48	11,29	11,12

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		400	410	420	430	440	450	460
38	—	12,64	12,42	12,20	12,00	11,80	11,61	11,43
39	—	12,99	12,76	12,54	12,33	12,13	11,93	11,74
40	—	13,35	13,11	12,88	12,66	12,45	12,25	12,06
41	—	13,70	13,46	13,22	12,99	12,78	12,57	12,37
42	—	14,06	13,80	13,56	13,33	13,10	12,89	12,68
43	—	14,41	14,15	13,90	13,66	13,43	13,21	13,00
44	—	14,77	14,50	14,24	14,00	13,76	13,53	13,32
45	—	15,13	14,85	14,59	14,33	14,09	13,86	13,63
46	—	15,49	15,20	14,93	14,67	14,42	14,18	13,95
47	—	15,85	15,56	15,28	15,01	14,75	14,50	14,27
48	—	16,21	15,91	15,62	15,35	15,08	14,83	14,59
49	—	16,58	16,26	15,97	15,69	15,42	15,16	14,91
50	—	16,94	16,62	16,32	16,03	15,75	15,48	15,23
52	—	17,67	17,34	17,02	16,71	16,42	16,14	15,87
54	—	18,41	18,06	17,72	17,40	17,09	16,80	16,52
56	—	19,16	18,78	18,43	18,09	17,76	17,46	17,16
58	—	19,90	19,51	19,14	18,78	18,45	18,12	17,82
60	—	20,66	20,25	19,85	19,48	19,13	18,79	18,47
62	—	21,42	20,98	20,58	20,19	19,82	19,46	19,13
64	—	22,18	21,73	21,30	20,89	20,50	20,14	19,79

Таблица П.20

Плотность водяного пара, кг/м³ ($p = 14 \dots 64$ кгс/см², $t = 470 \dots 530$ °C)

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		470	480	490	500	510	520	530
14	—	4,054	3,997	3,943	3,890	—	—	—
15	—	4,348	4,286	4,228	4,170	—	—	—
16	—	4,640	4,577	4,513	4,452	—	—	—
17	—	4,936	4,866	4,798	4,735	—	—	—
18	—	5,230	5,157	5,086	5,015	—	—	—
19	—	5,528	5,450	5,373	5,299	—	—	—
20	—	5,824	5,740	5,659	5,583	—	—	—
21	—	6,120	6,031	5,949	5,865	—	—	—
22	—	6,418	6,325	6,238	6,150	—	—	—
23	—	6,716	6,618	6,527	6,435	—	—	—
24	—	7,013	6,911	6,817	6,720	—	—	—
25	—	7,310	7,205	7,102	7,008	—	—	—

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		470	480	490	500	510	520	530
26	—	7,610	7,502	7,396	7,294	—	—	—
27	—	7,911	7,800	7,686	7,576	—	—	—
28	—	8,217	8,097	7,981	7,868	—	—	—
29	—	8,518	8,389	8,271	8,150	—	—	—
26	—	7,610	7,502	7,396	7,294	—	—	—
27	—	7,911	7,800	7,686	7,576	—	—	—
28	—	8,217	8,097	7,981	7,868	—	—	—
29	—	8,518	8,389	8,271	8,150	—	—	—
30	—	8,818	8,688	8,562	8,439	—	—	—
31	—	9,116	8,985	8,857	8,726	—	—	—
32	—	9,425	9,285	9,149	9,017	—	—	—
33	—	9,726	9,578	9,443	9,311	—	—	—
34	—	10,03	9,880	9,736	9,597	—	—	—
35	—	10,33	10,18	10,03	9,887	—	—	—
36	—	10,64	10,48	10,33	10,18	—	—	—
37	—	10,95	10,78	10,62	10,47	—	—	—
38	—	11,25	11,08	10,92	10,76	—	—	—
39	—	11,56	11,39	11,22	11,05	—	—	—
40	—	11,87	11,69	11,51	11,35	—	—	—
41	—	12,18	11,99	11,81	11,64	—	—	—
42	—	12,49	12,29	12,11	11,93	—	—	—
43	—	12,80	12,60	12,41	12,23	—	—	—
44	—	13,11	12,90	12,71	12,52	—	—	—
45	—	13,42	13,21	13,01	12,82	—	—	—
46	—	13,73	13,52	13,31	13,11	—	—	—
47	—	14,04	13,82	13,61	13,41	—	—	—
48	—	14,35	14,13	13,91	13,70	—	—	—
49	—	14,67	14,44	14,21	14,00	—	—	—
50	—	14,98	14,74	14,52	14,30	14,09	13,88	13,69
52	—	15,01	15,36	15,13	14,90	14,67	14,46	14,25
54	—	16,24	15,98	15,74	15,49	15,26	15,04	14,82
50	—	16,88	16,61	16,35	16,10	15,85	15,62	15,39
58	—	17,52	17,24	16,96	16,70	16,44	16,20	15,97
60	—	18,16	17,86	17,58	17,30	17,04	16,79	16,54
62	—	18,80	18,49	18,20	17,91	17,64	17,37	17,12

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		470	480	490	500	510	520	530
64	—	19,45	19,13	18,82	18,52	18,23	17,96	17,69

Таблица П.21

Плотность водяного пара, кг/м³ ($p = 14 \dots 64$ кгс/см², $t = 510 \dots 600$ °C)

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		510	550	560	570	580	590	600
14	—	—	—	—	—	—	—	—
...
49	—	—	—	—	—	—	—	—
50	—	13,50	13,31	13,13	12,96	12,79	12,62	12,46
52	—	14,05	13,86	13,67	13,49	13,31	13,14	12,98
54	—	14,61	14,41	14,21	14,02	13,84	13,66	13,49
56	—	15,17	14,97	14,76	14,56	14,37	14,18	14,00
58	—	15,74	15,52	15,30	15,10	14,90	14,70	14,52
60	—	16,30	16,07	15,85	15,64	15,43	15,23	15,03
62	—	16,87	16,63	16,40	16,18	15,96	15,75	15,55
64	—	17,44	17,19	16,95	16,72	16,49	16,28	16,06

Таблица П.22

Плотность водяного пара, кг/м³ ($p = 66 \dots 300$ кгс/см², $t = 290 \dots 350$ °C),
параметры на линии насыщения

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		290	300	320	320	330	340	350
66	280,55	31,9	30,52	29,34	28,32	27,41	26,60	25,87
68	282,54	83,2	31,77	30,49	29,39	28,43	27,57	26,79
70	284,48	34,7	33,04	31,67	30,50	29,46	28,55	27,71
72	286,39	36,15	34,35	32,87	31,61	30,52	29,54	28,67
74	288,25	37,68	35,70	34,09	32,75	31,59	30,55	29,64
76	290,08	—	37,09	35,36	33,92	32,67	31,58	30,61
78	291,86	—	38,54	36,68	35,10	33,77	32,62	31,60
80	293,62	—	40,03	37,98	36,31	34,90	33,67	32,59
82	295,34	—	41,56	39,35	37,55	36,05	34,75	33,60
84	297,03	—	43,18	40,75	38,83	37,19	35,84	34,63
86	298,69	—	44,84	42,21	40,13	38,42	36,95	35,68
88	300,31	—	—	43,71	41,46	39,64	38,08	36,74
90	301,92	—	—	45,27	42,84	40,88	39,23	37,81
92	303,49	—	—	46,86	44,25	42,14	40,40	38,90
94	305,04	—	—	48,54	45,70	43,44	41,60	40,00
96	306,56	—	—	50,28	47,19	44,78	42,81	41,14

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		290	300	320	320	330	340	350
98	308,06	—	—	52,1	48,73	46,15	44,05	42,27
100	309,53	—	—	54,0	50,3	47,55	45,31	43,44
105	313,12	—	—	—	54,6	51,20	48,59	46,45
110	316,58	—	—	—	59,3	55,2	52,1	49,60
115	319,92	—	—	—	64,6	59,5	55,8	52,9
120	323,15	—	—	—	—	64,2	59,7	56,4
125	326,27	—	—	—	—	69,5	64,1	60,1
130	329,30	—	—	—	—	75,6	68,7	64,1
140	335,08	—	—	—	—	—	79,7	72,9
145	337,86	—	—	—	—	—	86,5	77,9
150	340,55	—	—	—	—	—	—	83,4
155	343,18	—	—	—	—	—	—	89,8
160	345,74	—	—	—	—	—	—	97,0
165	348,23	—	—	—	—	—	—	105,6
170	350,66	—	—	—	—	—	—	—
175	353,03	—	—	—	—	—	—	—
180	355,35	—	—	—	—	—	—	—
185	357,61	—	—	—	—	—	—	—
190	359,82	—	—	—	—	—	—	—
195	361,97	—	—	—	—	—	—	—
200	364,08	—	—	—	—	—	—	—
210	368,16	—	—	—	—	—	—	—
220	372,05	—	—	—	—	—	—	—
230		—	—	—	—	—	—	—
300		—	—	—	—	—	—	—

Таблица П.23

Плотность водяного пара, кг/м³ ($p = 66 \dots 300$ кгс/см², $t = 360 \dots 420$ °C)

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		360	370	380	390	400	410	420
66	—	25,19	24,57	23,99	23,46	22,95	22,48	22,03
68	—	26,08	25,43	24,82	24,25	23,72	23,23	22,76
70	—	26,98	26,29	25,65	25,06	24,51	23,99	23,50
72	—	27,89	27,16	26,49	25,87	25,30	24,75	24,24
74	—	28,80	28,04	27,34	26,70	26,09	25,52	24,99
76	—	29,73	28,93	28,20	27,52	26,89	26,30	25,74
78	—	30,66	29,83	29,06	28,35	27,69	27,08	26,50

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		360	370	380	390	400	410	420
80	—	31,62	30,74	29,93	29,19	28,51	27,86	27,26
82	—	32,58	31,66	30,82	30,04	29,33	28,65	28,03
84	—	33,56	32,58	31,71	30,89	30,15	29,45	28,80
86	—	34,54	33,52	32,60	31,75	30,98	30,26	29,58
88	—	35,54	34,47	33,51	32,63	31,82	31,07	30,36
90	—	36,55	35,44	34,42	33,50	32,66	31,88	31,15
92	—	37,58	36,40	35,35	34,39	33,51	32,70	31,94
94	—	38,62	37,38	36,28	35,29	34,38	33,52	32,74
96	—	39,67	38,39	37,23	36,19	35,24	34,36	33,55
98	—	40,75	39,40	38,20	37,11	36,11	35,20	34,35
100	—	41,82	40,42	39,15	38,02	37,00	36,05	35,17
105	—	44,60	43,03	41,63	40,37	39,23	38,20	37,24
110	—	47,51	45,72	44,17	42,77	41,53	40,39	39,34
115	—	50,5	48,52	46,77	45,25	43,88	42,63	41,49
120	—	53,7	51,4	49,48	47,78	46,27	44,92	43,69
125	—	57,0	54,4	52,3	50,4	48,73	47,26	45,91
130	—	60,5	57,6	55,2	53,1	51,3	49,65	48,19
135	—	64,1	60,9	58,2	55,9	53,9	52,1	50,5
140	—	68,1	64,4	61,3	58,8	56,6	54,6	52,9
145	—	72,2	67,9	64,6	61,7	59,3	57,2	55,3
150	—	76,7	71,8	67,9	64,8	62,2	59,8	57,8
155	—	81,5	75,8	71,5	68,0	65,1	62,6	60,4
160	—	86,8	80,1	75,2	71,3	68,1	65,4	63,0
165	—	92,6	84,7	79,2	74,8	71,3	68,3	65,7
170	—	99,1	89,8	83,3	78,4	74,5	71,2	68,4
175	—	106,6	95,1	87,7	82,2	77,9	74,3	71,3
180	—	115,4	101,1	92,4	86,2	81,4	77,5	74,2
185	—	126,4	107,6	97,4	90,4	85,0	80,8	77,2
190	—	—	115,1	102,9	94,8	88,9	84,1	80,3
195	—	—	123,7	108,8	99,5	92,8	87,6	83,4
200	—	—	133,9	115,3	104,5	97,0	91,3	86,7
210	—	—	165,3	130,6	115,7	106,1	99,1	93,5
220	—	—	—	151,1	128,8	116,2	107,5	100,9
230	—	—	—	183,2	144,8	127,8	116,9	108,9
240	—	—	—	—	165,6	141,2	127,2	117,5
250	—	—	—	—	194,9	157,2	138,9	127,0

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		360	370	380	390	400	410	420
260	—	—	—	—	242,7	177,0	152,2	137,3
270	—	—	—	—	—	202,4	167,6	148,8
280	—	—	—	—	—	236,1	185,8	161,7
290	—	—	—	—	—	280,3	207,5	176,1
300	—	—	—	—	—	329,7	233,5	192,6

Таблица П.24

Плотность водяного пара, кг/м³ ($p = 66 \dots 300$ кгс/см², $t = 430 \dots 490$ °C)

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		430	440	450	460	470	480	490
66	—	21,60	21,20	20,82	20,45	20,10	19,76	19,44
68	—	22,32	21,90	21,50	21,11	20,75	20,40	20,07
70	—	23,04	22,60	22,18	21,79	21,40	21,04	20,70
72	—	23,76	23,30	22,87	22,46	22,06	21,69	21,33
74	—	24,49	24,02	23,56	23,13	22,72	22,33	21,96
76	—	25,22	24,73	24,25	23,81	23,39	22,98	22,59
78	—	23,95	25,44	24,96	24,49	24,66	23,64	23,23
80	—	26,70	26,16	25,66	25,18	24,72	24,29	23,87
82	—	27,44	26,89	26,36	25,87	25,39	24,94	24,52
84	—	28,19	27,62	27,07	26,56	26,07	25,61	25,16
86	—	28,94	28,35	27,78	27,26	26,75	26,27	25,81
88	—	29,71	29,09	28,51	27,96	27,43	26,93	26,46
90	—	30,47	29,82	29,22	28,65	28,11	27,60	27,11
92	—	31,24	30,57	29,95	29,36	28,80	28,27	27,77
94	—	32,01	31,33	30,68	30,08	29,50	28,94	28,42
96	—	32,79	32,08	31,41	30,78	30,18	29,62	29,09
98	—	33,57	32,84	32,14	31,50	30,88	30,30	29,75
100	—	34,36	33,60	32,89	32,22	31,59	30,99	29,52
105	—	36,35	35,54	34,76	34,04	33,36	32,71	32,09
110	—	38,39	37,50	36,66	35,88	35,14	34,45	33,80
115	—	40,45	39,48	38,58	37,74	36,95	36,21	35,51
120	—	42,55	41,51	40,54	39,64	38,79	37,99	37,24
125	—	44,68	43,55	42,52	41,55	40,65	39,79	38,99
130	—	46,86	45,66	44,54	43,50	42,52	41,61	40,75
135	—	49,09	47,78	46,58	45,45	44,42	43,46	42,55
140	—	51,4	49,95	48,66	47,46	46,36	45,33	44,37
145	—	53,7	52,2	50,8	49,50	48,31	47,21	46,19

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		430	440	450	460	470	480	490
150	—	56,0	54,4	52,9	51,6	50,3	49,14	48,03
155	—	58,4	56,7	55,1	53,7	52,3	51,1	49,9
160	—	60,9	59,0	57,3	55,8	54,4	53,0	51,8
165	—	63,4	61,4	59,6	57,9	56,4	55,0	53,7
170	—	66,0	63,8	61,9	60,1	58,5	57,0	55,7
175	—	68,6	66,3	64,2	62,3	60,6	59,1	57,6
180	—	71,3	68,8	66,6	64,6	62,8	61,2	59,6
185	—	74,1	71,4	69,1	66,9	65,0	63,2	61,6
190	—	76,9	74,1	71,5	69,2	67,2	65,4	63,6
195	—	79,8	76,8	74,1	71,6	69,5	67,5	65,7
200	—	82,8	79,5	76,6	74,1	71,8	69,7	67,8
210	—	89,0	85,2	82,0	79,0	76,5	74,2	72,1
220	—	95,7	91,2	87,5	84,2	81,4	78,8	76,5
230	—	102,7	97,6	93,3	89,7	86,4	83,5	81,0
240	—	110,2	104,3	99,4	95,2	91,7	88,5	85,6
250	—	118,2	111,4	105,8	101,1	97,1	93,5	90,4
260	—	126,9	118,9	112,5	107,2	102,7	98,8	95,3
270	—	136,3	126,9	119,6	113,6	108,5	104,2	100,4
280	—	146,4	135,5	127,1	120,3	114,6	109,8	105,6
290	—	157,6	144,7	135,0	127,3	121,0	115,6	111,0
300	—	169,8	154,6	143,4	134,7	127,6	121,6	116,5

Таблица П.25

Плотность водяного пара, кг/м³ ($p = 66 \dots 300$ кгс/см², $t = 500 \dots 560$ °C)

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		500	510	520	530	540	550	560
66	—	19,13	18,84	18,55	18,27	18,00	17,75	17,50
68	—	19,75	19,44	19,14	18,85	18,58	18,31	18,05
70	—	20,36	20,04	19,73	19,44	19,15	18,83	18,61
72	—	20,98	20,65	20,33	20,02	19,72	19,44	19,16
74	—	21,60	21,25	20,92	20,61	20,30	20,00	19,72
76	—	22,22	21,87	21,52	21,20	20,88	20,57	20,28
78	—	22,85	22,48	22,12	21,79	21,46	21,14	20,84
80	—	23,47	23,09	22,73	22,38	22,04	21,71	21,40
82	—	24,10	23,71	23,33	22,97	22,62	22,29	21,96
84	—	24,73	24,33	23,94	23,56	23,20	22,86	22,52
86	—	25,37	24,95	24,55	24,16	23,79	23,44	23,09

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		500	510	520	530	540	550	560
88	—	26,01	25,58	25,16	24,76	24,38	24,01	23,66
90	—	26,64	26,20	25,77	25,36	24,97	24,59	24,22
92	—	27,28	26,82	26,38	25,96	25,56	25,17	24,79
94	—	27,93	27,46	27,00	26,57	26,15	25,75	25,36
96	—	28,58	28,09	27,62	27,17	26,74	26,33	25,93
98	—	29,22	28,72	28,24	27,78	27,34	26,92	26,51
100	—	29,88	29,36	28,87	28,39	27,94	27,50	27,09
105	—	31,52	30,96	30,43	29,92	29,44	28,98	28,53
110	—	33,17	32,57	32,01	31,47	30,95	30,46	29,98
115	—	34,84	34,21	33,60	33,02	32,48	31,95	31,45
120	—	36,52	35,86	35,21	34,60	34,01	33,46	32,92
125	—	38,23	37,51	36,83	36,18	35,56	34,96	34,40
130	—	39,95	39,18	38,46	37,78	37,12	36,50	36,89
135	—	41,68	40,88	40,11	39,39	38,70	38,04	37,40
140	—	43,44	42,59	41,77	41,02	40,27	39,57	38,91
145	—	45,23	44,33	43,46	42,64	41,88	41,14	40,44
150	—	47,01	46,06	45,15	44,29	43,48	42,70	41,98
155	—	48,83	47,82	46,86	45,96	45,11	44,29	43,52
160	—	50,7	49,60	48,59	47,64	46,75	45,89	45,06
165	—	52,5	51,4	50,3	49,33	48,38	47,48	46,64
170	—	54,4	53,2	52,1	51,0	50,05	49,12	48,22
175	—	56,3	55,0	53,9	52,8	51,7	50,7	49,80
180	—	58,2	56,9	55,6	54,5	53,4	52,4	51,4
185	—	60,1	58,8	57,5	56,2	55,1	54,0	53,0
190	—	62,1	60,6	59,3	58,0	50,8	55,7	54,6
195	—	64,1	62,6	61,1	59,8	58,5	57,4	56,3
200	—	66,1	64,5	63,0	61,6	60,3	59,1	57,9
210	—	70,2	68,4	66,8	65,3	63,9	62,5	61,2
220	—	74,3	72,4	70,6	69,0	67,4	66,0	64,6
230	—	78,7	76,6	74,6	72,8	71,1	69,5	68,1
240	—	83,1	80,8	78,6	76,6	74,8	73,2	71,5
250	—	87,6	85,0	82,7	80,6	78,6	76,8	75,1
260	—	92,2	89,4	86,9	84,6	82,5	80,5	78,7
270	—	97,0	94,0	91,2	88,7	86,4	84,2	82,3
280	—	101,9	98,6	95,6	92,8	90,4	88,1	86,0
290	—	106,9	103,3	100,1	97,1	94,5	92,0	89,8

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		500	510	520	530	540	550	560
300	—	112,1	108,2	104,7	101,5	98,6	96,0	93,5

Таблица П.26

Плотность водяного пара, кг/м³ ($p = 66 \dots 300$ кгс/см², $t = 570 \dots 600$ °C)

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C			
		570	580	590	600
66	—	17,26	17,03	16,80	16,58
68	—	17,81	17,56	17,33	17,10
70	—	18,35	18,10	17,86	17,62
72	—	18,90	18,64	18,39	18,15
74	—	19,44	19,18	18,92	18,67
76	—	19,99	19,72	19,45	19,19
78	—	20,54	20,26	19,98	19,72
80	—	21,09	20,80	20,52	20,24
82	—	21,64	21,34	21,05	20,77
84	—	22,20	21,89	21,59	21,29
86	—	22,76	22,44	22,12	21,82
88	—	23,32	22,98	22,66	22,36
90	—	23,87	23,53	23,20	22,88
92	—	24,43	24,08	23,74	23,42
94	—	24,99	24,63	24,28	23,95
96	—	25,56	25,18	24,83	24,49
98	—	26,12	25,74	25,37	25,02
100	—	26,68	26,30	25,92	25,56
105	—	28,10	27,69	27,29	26,90
110	—	29,52	28,69	28,66	28,26
115	—	30,96	30,50	30,05	29,62
120	—	32,40	31,92	31,44	30,98
125	—	33,86	33,34	32,84	32,36
130	—	35,32	34,77	34,25	33,74
135	—	36,79	36,22	35,66	35,12
140	—	38,28	37,66	37,08	36,52
145	—	39,76	39,12	38,52	37,92
150	—	41,27	40,60	39,95	39,34
165	—	42,77	42,07	41,41	40,75
160	—	44,31	43,57	42,86	41,18
165	—	45,83	45,06	44,33	43,61

Окончание табл. П.26

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C			
		570	580	590	600
170	—	47,37	46,55	45,79	45,06
175	—	48,92	48,08	47,28	46,51
180	—	50,5	49,60	48,76	47,94
185	—	52,1	51,1	50,2	49,43
190	—	53,6	52,7	51,8	50,9
195	—	55,2	54,2	53,3	52,4
200	—	56,8	55,8	54,8	53,9
210	—	60,1	59,0	57,9	56,9
220	—	63,4	62,2	61,0	59,9
230	—	66,7	65,4	64,1	63,0
240	—	70,0	68,6	67,3	66,1
250	—	73,5	72,0	70,6	69,2
260	—	76,9	75,4	73,9	72,4
270	—	80,4	78,7	77,1	75,6
280	—	84,0	82,2	80,4	78,9
290	—	87,6	85,7	83,9	82,2
300	—	91,3	89,2	87,3	85,5

Таблица П.27

Плотность водяного пара, кг/м³ ($p = 310 \dots 400$ кгс/см², $t = 400 \dots 460$ °C)

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		400	410	420	430	440	450	460
310	—	372,6	263,9	211,2	183,2	165,2	152,3	142,4
320	—	405,2	297,7	232,2	197,9	176,6	161,7	150,5
330	—	429,9	331,5	255,6	214,0	188,9	171,8	159,1
340	—	449,2	361,9	280,7	231,6	202,1	182,4	168,0
350	—	465,1	388,0	306,6	250,6	216,3	193,7	177,5
360	—	478,5	409,8	331,8	270,6	231,4	205,6	187,4
370	—	490,0	428,1	355,2	291,1	247,3	218,2	197,7
380	—	500,2	443,7	376,4	311,7	263,8	231,4	208,6
390	—	509,2	457,0	394,9	331,7	280,9	245,1	219,9
400	—	517,3	469,0	411,5	350,5	298,0	259,3	231,5

Таблица П.28

Плотность водяного пара, кг/м³ ($p = 310 \dots 400$ кгс/см², $t = 470 \dots 530$ °C)

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		470	480	490	500	510	520	530
310	—	134,4	127,9	122,2	117,4	113,1	109,3	105,9
320	—	141,6	134,3	128,2	122,9	118,2	114,2	110,5

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		470	480	490	500	510	520	530
330	—	149,1	141,0	134,3	128,3	123,5	119,1	115,1
340	—	156,9	148,0	140,6	134,3	128,8	124,1	119,8
350	—	165,1	155,2	147,1	140,2	134,4	129,2	124,6
360	—	173,6	162,7	153,8	146,4	140,0	134,5	129,6
370	—	182,4	170,5	160,8	152,7	145,8	139,8	134,6
380	—	191,6	178,5	167,9	159,1	151,7	145,3	139,7
390	—	201,2	186,8	175,3	165,8	157,8	150,9	144,9
400	—	211,1	195,4	182,8	172,6	164,0	156,6	150,2

Таблица П.29

Плотность водяного пара, кг/м³ ($p = 310 \dots 400$ кгс/см², $t = 540 \dots 600$ °C)

p , кгс/см ²	$t_{\text{нас}}$, °C	t , °C						
		540	550	560	570	580	590	600
310	—	102,9	100,0	97,4	95,1	92,8	90,7	88,8
320	—	107,2	104,1	99,4	98,8	96,4	94,2	92,2
330	—	111,6	108,3	105,4	102,7	100,2	97,8	95,6
340	—	116,0	112,6	109,4	106,5	103,9	101,4	99,1
350	—	120,6	116,9	113,5	110,5	107,7	105,0	102,6
360	—	125,2	121,3	117,7	114,5	111,5	108,7	106,2
370	—	129,9	125,8	122,0	118,5	115,4	112,5	109,8
380	—	134,7	130,3	126,3	122,6	119,3	116,2	113,4
390	—	139,6	134,9	130,6	126,8	123,3	120,0	117,0
400	—	144,6	139,6	135,1	131,0	127,3	123,9	120,7

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Диафрагмы, сопла ИСА 1932 и трубы Вентури, установленные в заполненных трубопроводах круглого сечения. Технические условия: ГОСТ 8.563.1 – 97. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 62 с.
2. ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Методика выполнения измерений с помощью сужающих устройств: ГОСТ 8.563.2 – 97. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 86 с.
3. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки: ГОСТ 30319.1 – 96.
4. Преображенский, В.П. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов по специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов» / В.П. Преображенский. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Определение расхода методом переменного перепада давления	3
1.1. Измерительные системы с использованием стандартных сужающих устройств	5
1.2. Стандартные диафрагмы	12
1.3. Сопла ИСА-1932	15
1.4. Трубы и сопла Вентури	17
1.5. Принцип определения расхода с применением стандартных сужающих устройств	22
2. Методика определения расхода среды по величине перепада давления на стандартном СУ	
2.1. Расчет расхода среды	23
2.2. Расчет потери давления на сужающем устройстве	28
2.3. Расчет погрешности определения расхода	
2.3.1. Общие положения	28
2.3.2. Классификация погрешностей	30
2.3.3. Особенности определения погрешности измерения расхода методом переменного перепада давления	32
2.3.4. Общий подход к расчету погрешности определения расхода	33
2.3.5. Составляющие погрешности	36
3. Определение физических свойств контролируемой среды	
3.1. Вязкость среды	42
3.2. Показатель адиабаты	43
3.3. Плотность среды	43
3.4. Расход газа, приведенный к стандартным условиям	49
3.5. Обработка показаний дифманометров	50
4. Расчет диаметра отверстия диафрагмы и шкалы дифманометра	51
5. Описание программ расчета	52
6. Примеры расчета	
6.1. Расчет расхода воды	53
6.2. Расчет расхода пара	58
6.3. Расчет расхода газа	63
6.4. Расчет диаметра отверстия диафрагмы	65
7. Требования к оформлению отчета	66
8. Контрольные вопросы	66
Приложение. Физические свойства газов и жидкостей	69
Библиографический список	101