

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**(ДГТУ)**

Кафедра «Химические технологии нефтегазового комплекса»

**Методические указания**

к практическим и контрольным работам

по дисциплине

«Химическая переработка углеводородных газов»

Ростов-на-Дону

2025

УДК 665

Составители: Флик Е.А., Жукова И. Ю.

Методические указания к практическим и контрольным работам по дисциплине «Химическая переработка углеводородных газов»/ сост. Флик Е.А., Жукова И. Ю. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2025. – 35 с.

В Методических указаниях кратко изложены теоретические вопросы для успешного выполнения практических и контрольных работ.

Предназначено для обучающихся по направлению подготовки 18.03.01 Химическая технология всех форм обучения.

УДК 665

Ответственный за выпуск зав. кафедрой «ХТНГК» д.т.н., профессор Жукова И.Ю.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

В печать \_\_\_\_\_\_\_\_\_

Формат 60×84/16. Объем \_\_\_\_\_\_\_ усл. п. л.

Тираж 50 экз. Заказ № \_\_\_\_

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Издательский центр ДГТУ

Адрес университета и полиграфического предприятия:

344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

© Донской государственный

технический университет, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

[ВВЕДЕНИЕ 4](#_Toc131502253)

[Расчет физико-химических свойств и состава углеводородных газов 5](#_Toc131502254)

[Тема1. Особенности расчета физико-химических свойств и состава углеводородных газов. Плотность газов. 5](#_Toc131502255)

[Задачи 7](#_Toc131502256)

[Тема 2. Критические и приведенные параметры газов. Вязкость газовых смесей 8](#_Toc131502257)

[Задачи 12](#_Toc131502258)

[Тема 3. Тепловые свойства газов 13](#_Toc131502259)

[Тема 4. Сжиженные углеводородные газы 19](#_Toc131502260)

[Задачи 25](#_Toc131502261)

[Перечень теоретических вопросов для подготовки к экзамену по «ХПУГ» 27](#_Toc131502262)

[Перечень использованных информационных источников 29](#_Toc131502263)

[Варианты контрольной работы 30](#_Toc131502264)

[Приложение 1 - Физико-химическая характеристика газов 31](#_Toc131502265)

[Приложение 2 – Номограмма для определения поправки ΔСр°к теплоемкости газов 33](#_Toc131502266)

[Приложение 3- Номограмма для определения к теплоемкости газов 34](#_Toc131502267)

# ВВЕДЕНИЕ

Газодобывающая и газоперерабатывающая промышленности являются ведущими отраслями, обеспечивающими потребителей энергоресурсами и другими специальными продуктами (удобрения, сера и др.).

Немаловажным является улучшение качества выпускаемых продуктов, их рациональное и экономное потребление, замена, в ряде случаев, более доступными газовыми смесями. Решение таких задач требует глубоких знаний процессов переработки газа, их технологического оформления, выбора и расчетного обоснования оптимальных режимов работы.

Данное методическое указание подготовлено в соответствии с действующими учебными программами курса “Химическая переработка углеводородных газов» для студентов всех форм обучения направления 18.03.01 Химическая технология (профили: «Технология переработка нефти и газа», «Нефтегазовые технологии и защита от коррозии объектов НГК»). Оно призвано не только углубить теоретическое освоение предмета, но и дать представление о тех практических проблемах, с которыми приходится сталкивать специалистам по переработке углеводородных газов.

В методических указаниях рассмотрены примеры расчета важнейших физико-химических характеристик углеводородных газов, предложены задачи для самостоятельного решения.

Расчет физико-химических свойств и состава углеводородных газов

## **Тема1. Особенности расчета физико-химических свойств и состава углеводородных газов. Плотность газов.**

**Общие свойства газовых смесей**. По сравнению с молекулами жидкости молекулы газов удалены друг от друга на неизмеримо большие расстояния, чем их собственные размеры. С этим связаны некоторые особые свойства газов, например способность к сжатию со значительным изменением объема, заметное повышение давления с ростом температуры и т.д. Поведение газообразных веществ достаточно полно объясняет кинетическая теория газов, основу которой составляют законы газового состояния Бойля-Мариотта, Гей-Люссака и Шарля. Эти законы могут быть выражены объединенным уравнением (законом) Клайперона-Менделеева:

*pV=NRT* (1.1)

Здесь *R* – универсальная газовая постоянная, значение которой зависит от выбора системы единиц. Так, в СИ, где давление выражено в паскалях, объем – в кубических метрах и температура – в кельвинах, для одного моля газа *R*=8,314 Дж/(моль⋅К).

Зависимость между парциальными давлениями *pi* компонентов газовой смеси и общим давлением *p* в системе устанавливается законом Дальтона:

*p=p1+p2+…+pn=Σpi*, (1.2)

где .

В соответствии с законом Рауля в условиях равновесия можно записать  (1.3)

(или по уравнению1.4) :

 (1.4)

Приведенные выше законы полностью справедливы для идеальных газов. Углеводородные газы и нефтяные пары можно приближенно считать идеальными газами, особенно при невысоких давлениях. При расчетах допустимо использовать все названные законы. Об особых случаях расчета будет сказано ниже.

Напомним, что в приложении к газам существуют нормальные и стандартные условия, которые при одном и том же давлении (101,3 кПа) отличаются только температурой (273 К и 293 К, соответственно для нормальных и стандартных условий). Параметры, характеризующие состояние газа в нормальных условиях, имеют индекс 0 (*V0, p0, T0*), в стандартных – 20 (*V20, p20, T20*). Приведение объема газа к нормальным или стандартным условиям легко осуществляется по формулам (1.5,1.6):

 (1.5)  (1.6)

Пример 1.1. В баллоне вместимостью 0,2 м3 при давлении 3⋅105 Па и температуре 20°С находится газовая смесь, средняя молярная масса которой *М* = 48 г/моль. Определить массу газовой смеси.

Решение. Зная, что число молей равно отношению массы вещества к его молярной массе, запишем уравнение Клапейрона-Менделеева в виде *pV=(m/M)RT*. Выразим массу газа *m*: *m=pVM/RT*. Подставив известные значения параметров, определим массу газа:



Пример 1.2. Газ при давлении 230 кПа и температуре 46°С занимает объем 1,5 м3. Привести объем газа к нормальным условиям.

Решение. Нормальный объем газа определим, имея в виду, что *Т0*=273 К и *р0*=101,3 кПа,



**Плотность**. Как и для жидкости, плотность газа может быть выражена абсолютным или относительным значением. Абсолютная плотность газа равна его массе в единице объема, в СИ она выражается в килограммах на кубический метр (кг/м3). Величину, обратную плотности, называют удельным объемом и измеряют в кубических метрах на килограмм (м3/кг).

При определении относительной плотности газов и паров нефтепродуктов в качестве стандартного вещества берется воздух при нормальных условиях (*Т*=273 К, *ρ* = 101,3 кПа). Отношение массы газа *m* к массе воздуха *mв*, взятых в одинаковых объемах и при тех же температуре и давлении, дает относительную плотность газа:



Масса любого идеального газа при нормальных условиях равна его молярной массе, поделенной на объем, занимаемый одним молем, т.е. , где - плотность газа при нормальных условиях.

Тогда для относительной плотности газа по воздуху можно записать  – молярная масса воздуха, г/моль.

Если записать уравнение Клапейрона-Менделеева в виде *m/V=pM/RТ,* нетрудно увидеть, что левая часть представляет собой плотность газа *ρ*, т.е.

*ρ = ρM/RТ* (1.7)

Формула (19) дает возможность подсчитать истинную плотность газа при любых температуре и давлении.

Существует другая модификация уравнения Клапейрона-Менделеева, также позволяющая определить плотность газа при любых условиях:

 (1.8)

Результаты, получаемые по формулам (1.8) и (1.9), одинаковы. Плотность некоторых индивидуальных газов в зависимости от изменения температуры можно, кроме того, найти по графикам и таблицам.

Пример 1.3. Относительная плотность газа равна 1,10. Определить его абсолютную плотность при 150°С и 750 кПа.

Решение. Найдем молярную массу газа:

*М* = 1,1·28,9 =31,8 кг/моль.

Абсолютную плотность газа определим по формуле:

 (1.9)

Тот же ответ получим, воспользовавшись формулой (1.8), однако в этом случае нужно выразить *М* в килограммах на моль (умножить на 10-3), чтобы привести в соответствие с единицами измерения универсальной газовой постоянной.

Плотность газовой смеси может быть подсчитана по формулам для жидкой смеси. Учитывая, что для газов объемные доли равны молярным, в приложении к газовой смеси можно записать 

Значения плотности и некоторых других свойств индивидуальных газов приведены в приложении 1.

## 

## **Задачи**

1. Определить вместимость баллона, в который можно закачать 6 м3 газа, измеренного при нормальных условиях. Максимальное давление в баллоне 15 МПа.

2. Во сколько раз возрастет давление в герметичном газовом резервуаре, если температура окружающего воздуха повысится с 10 до 24°С?

3. При давлении 360 кПа и температуре 400 К газ занимает объем 1,2 м3. Найти число молей газа.

4. Газ в количестве 9 кг находится в сосуде вместимостью 3 м3 при 298 К и 462 кПа. Найти молярную массу газа.

5. Определить объем газа при нормальных условиях, если при температуре 120°С и давлении 790 кПа его объем равен 16,3 м3.

6. Используя уравнение (20), найти плотность метана и этана при нормальных условиях.

7. Определить плотность пропана при 150 кПа и 80°С.

8. Средняя молярная масса водородсодержащего газа, применяемого в процессе каталитического риформинга, равна 3,5 г/моль. Рассчитать плотность этого газа при 450°С и 3 МПа.

9. Газовая смесь состоит из метана и водорода, парциальные давления которых равны   Определить содержание (в молярных долях) компонентов смеси.

10. Рассчитать плотность газовой смеси, состоящей из 14 кг пропана, 11 кг этана и 8 кг этилена. Плотности индивидуальных газов взять в прил.10.

11. Смешали 3 моля пропана и 7 молей пропилена. Какова плотность полученной смеси?

12. Относительная плотность газовой смеси по воздуху равна 1,3. При какой температуре абсолютная плотность станет равной 7 кг/м3, если давление в системе составляет 640 кПа?

13. Природный газ Астраханского происхождения имеет следующий состав (в объемных процентах): СН4 – 47,48; С2Н6 – 1,92; С3Н8 – 0,93; С4Н10 – 0,56; С5Н12 –3,08; N2 –1,98; СО2 – 21,55; Н2S – 22,5. Определить плотность газа при нормальных условиях.

## **Тема 2. Критические и приведенные параметры газов. Вязкость газовых смесей**

**Критические параметры**. Сущность критических параметров была изложена выше (пункт 2.2). Напомним, что критической является температура, выше которой газ невозможно перевести в жидкое состояние при любом давлении. Критические параметры большинства индивидуальных газов известны и приводятся в справочной литературе. В прил.1 даны эти величины для некоторых газов.

Для газовых смесей, являющихся не столь сложными по сравнению с нефтяными фракциями, критические параметры могут быть подсчитаны по правилу аддитивности. Например, критическая температура газовой смеси, состоящей из *n* компонентов, определяется по формуле

 (2.1)

Аналогично можно определить и другие критические параметры.

Критические параметры газов также могут быть определены в зависимости от молярной массы по графикам (рис. 2.1 и 2.2).

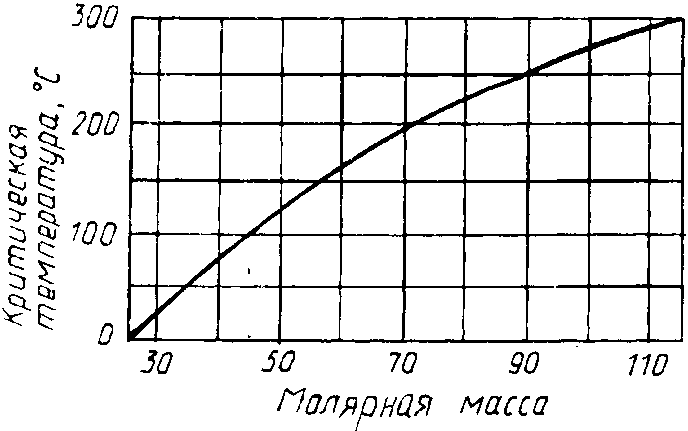


Рисунок 2.1 - График для определения критической температуры газов

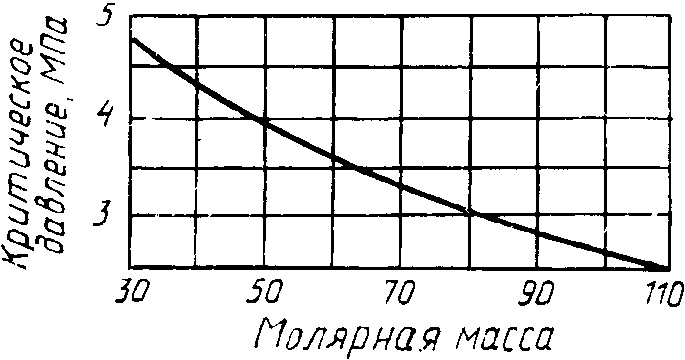


Рисунок 2.2 - График для определения критического давления газов

**Приведенные параметры**. Приведенные температура и давление для всех газов рассчитываются по формулам (2.2) и (2.3): *Тпр= Т/Ткр*; *рпр= р/ркр*, за исключением водорода, гелия и неона, для которых справедливы следующие уравнения: *Тпр=Т/(Ткр+8)*; *рпр=р/(ркр+8)* (2.4).

Пример 2.1. Газовая смесь состоит (в объемных процентах) из 15% этана и 85% пропана. Определить приведенные температуру и давление смеси при 120°С и 2,5 МПа.

Решение. По прил.10 найдем критические параметры: для этана *Ткр*= 305,5 К; *ркр*=4,89 МПа; для пропана *Ткр*= 370 К; *ркр*= 4,32 МПа.

Помня, что для газовой смеси объемные доли равны молярным, определим критические параметры смеси:

*Ткр*= 0,15·305,5 + 0,85·370 = 360,3 К;

*рк*= 0,15·4,89 + 0,85·4,32 = 4,4 МПа.

Далее по формулам (8) и (9) найдем приведенные параметры заданной смеси:

Выше было сказано, что реальные газовые смеси, встречающиеся на практике, могут иметь более или менее значительные отклонения от свойств идеальных газов. Поэтому для технологических расчетов часто используют уравнения Клайперона-Менделеева с поправкой *z: рV = zNRТ*. Здесь *z*, безразмерная эмпирическая поправка, называемая *коэффициентом (фактором) сжимаемости*.

Коэффициент сжимаемости при нормальных условиях *z0* для индивидуальных газов определяется по формуле *z0=*М/ρ022,4, где *ρ0* – плотность газа при нормальных условиях, найденная экспериментально (прил. 10).

По известному *z0*можно подсчитать коэффициент сжимаемости при других условиях по уравнению:

 (2.5)

Коэффициент сжимаемости газовых смесей, нефтяных паров и других веществ удобно определять по графикам (рис. 2.3 и 2.4), на которых он дан в зависимости от приведенных температуры и давления.

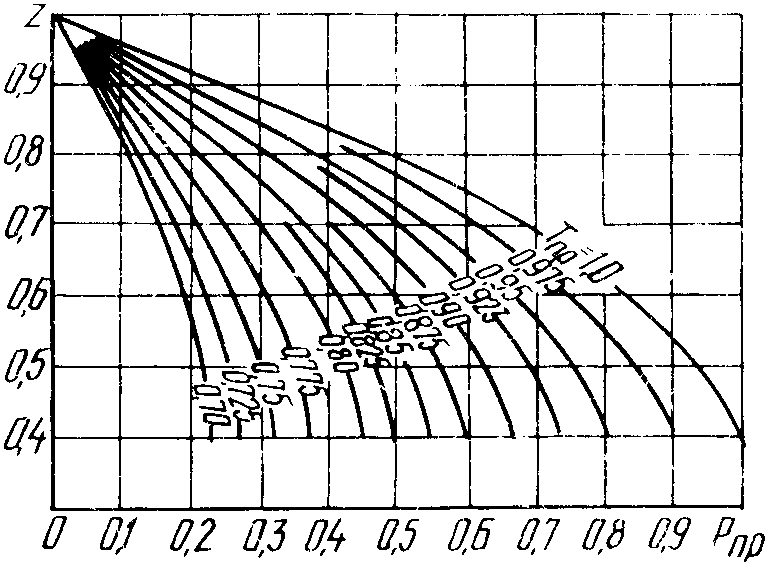


Рисунок 2.3 – График для определения коэффициента сжимаемости углеводородных газов при низких давлениях

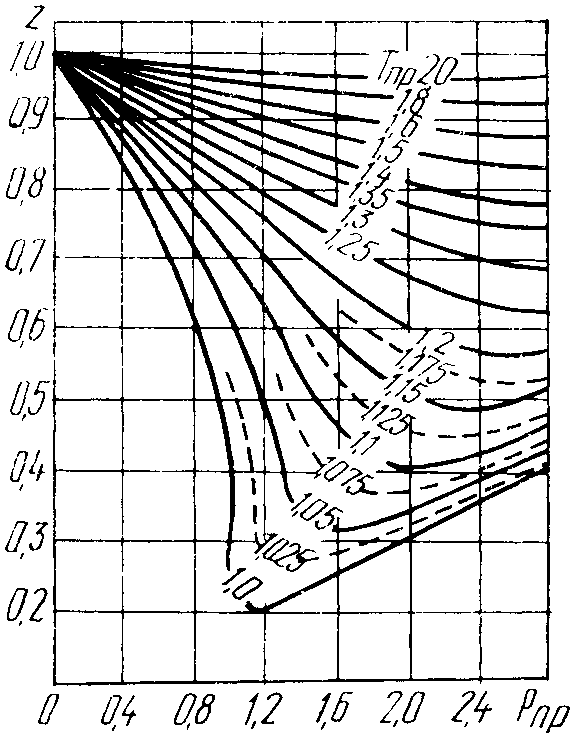


Рисунок 2.4 – График для определения коэффициента сжимаемости углеводородных газов при высоких давлениях

Пример 2.2. Определить коэффициент сжимаемости этилена при 2500 кПа и температуре 95°С, если при этих условиях он занимает объем 6,1 м3.

Решение. По прил.10 найдем плотность этилена при нормальных условиях *ρ0*= 1,2605 кг/м3. Зная молярную массу этилена – 28 г/моль, определим *z0*:



Прежде чем находить *z*, необходимо привести объем этилена к нормальным условиям, приняв нормальную температуру 273 К и нормальное давление 101,3 кПа.



Наконец, находим по формуле (21) коэффициент сжимаемости при заданных условиях:



**Вязкость**. Это физическое свойство, имеющее для газов ту же природу, что и вязкость жидкостей. Однако по сравнению с жидкостями зависимость вязкости газов от некоторых технологических параметров имеет свои особенности. Так, с повышением температуры и уменьшением молярной массы вязкость газов повышается. Для жидкостей наблюдается обратная картина. Можно принять, что до 5-6 МПа вязкость газов не зависит от давления.

Для газов и паров приняты динамическая и кинематическая вязкости, единицы измерения которых в СИ те же, что и для жидкостей (соответственно паскаль на секунду и квадратный метр на секунду, а также кратные им).

Динамическая вязкость *μ* (в паскалях на секунду) индивидуальных углеводородных газов при температуре *Т* может быть подсчитана по формуле Фроста

 (2.6)

Для определения вязкости газов применяются также различные графики . На рис. 2.5 дана зависимость отношения динамических вязкостей при заданных (*μ*) и нормальных (*μ0*) условиях от приведенных давления и температуры, которая широко используется в технологических расчетах.

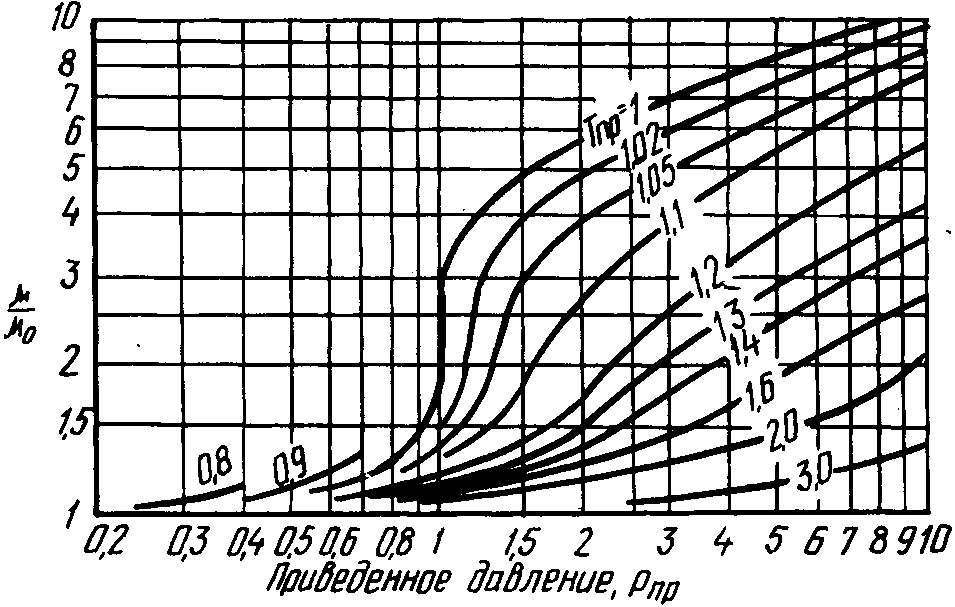


Рисунок 2.5 – График для определения динамической вязкости газов

Изменение вязкости газов в зависимости от температуры при атмосферном давлении описывается уравнением Сатерленда:

 (2.7)

где *μ0* – вязкость газа при нормальных условиях (прил.1), Па·с; *С* – постоянная.

Значения постоянной *С* для температурного интервала 20 – 200°С приведены в табл.2.1. Для приближенных расчетов величину *С* можно найти из выражения *С=1,22Тср ≅ 0,7Ткр*.

Таблица 2.1 -Значения постоянной *С*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Газ | С | Газ | С |
| Метан | 162 | Водород | 79 |
| Этилен | 225 | Азот | 104 |
| Этан | 252 | Кислород | 127 |
| Пропилен | 322 | Воздух | 107 |
| Пропан | 290 | Оксид углерода | 101 |
| изо-Бутилен | 339 | Диоксид углерода | 254 |
| изо-Бутан | 368 | Сероводород | 331 |
| н-Бутан | 377 | Водяной пар | 673 |
| н-Пентан | 383 |  |  |

Вязкость газовых смесей может быть подсчитана по правилу аддитивности лишь в том случае, если смесь составляют близкие по физическим характеристикам газы, например пропан – пропилен. При ориентировочной оценке вязкости допускается расчет и для разнородных смесей. При этом пользуются следующими уравнениями (2.8) и (2.9):

Пример 2.3. Газовая смесь имеет динамическую вязкость при нормальных условиях *μ0*=8,5·10-6Па·с, ее критические параметры *Ткр*= 113 °С, *ркр*= 3,9 МПа. Найти динамическую вязкость смеси при 151,5°С и 7,2 МПа.

Решение. Найдем приведенные параметры смеси:

Воспользуемся графиком (рис.12). Отложим на оси абсцисс значение *рпр*=1,85 и из полученной точки восстановим перпендикуляр до пересечения с кривой *Тпр*= 1,1. Точку пересечения сносим на ось ординат и получаем: *μ/μ0* = 2,5.

Откуда находим динамическую вязкость *μ* при заданных условиях:

*μ* = 2,5·10-6 = 21,25·10-6Па·с.

## **Задачи**

1. Газовая смесь состоит из 90% метана и 10% этана. Определить критические температуру и давление смеси (прил.10).

2. Дан состав смеси газов (в объемных процентах): этан – 5; пропан – 12; изо-бутан – 35; н-бутан – 48. Определить критические параметры смеси.

3.Относительная (по воздуху) плотность газовой смеси равна 0,84. Найти критические температуру и давление смеси.

4. Газовая смесь состоит из следующих компонентов (по объему): метан - 62%, этан - 21%, пропан -11%, сероводород – 6 %. Найти приведенные параметры смеси при 80°С и 750 кПа.

5. Найти приведенные температуру и давление пропана при 122°С и 6,2 МПа.

6. Найти коэффициент сжимаемости *изо*-бутана при 115°С и 1,95 МПа, если при нормальных условиях он занимает объем 8,3 м3.

7. Определить коэффициент сжимаемости пропан-бутановой смеси при 92°С и 2,06 МПа, в которой соотношение пропан:бутан=3:1 по объему.

8. Газ Уренгойского месторождения имеет следующий объемный состав: СН4 – 82,27%; С2Н6 – 6,56%; С3Н8 – 3,24%; С4Н10 – 1,49%; С5Н12 – 5,62%; N2 – 0,32%; СО2 – 0,5%. Найти коэффициент сжимаемости этого газа при 25°С и 6 МПа.

9. Определить динамическую вязкость пропилена при 70°С и атмосферном давлении.

10. Определить кинематическую вязкость пропана при 90°С и атмосферном давлении.

11. Какова динамическая вязкость этана при 110°С и давлении 101,3 кПа?

12. Подсчитать динамическую вязкость при 80°С пропан-пропиленовой фракции, состоящей их 15% пропана и 85% пропилена.

13. Найти кинематическую вязкость смеси бутана (70%) и бутилена (30%) при 65°С и 101,3 кПа.

**Тема 3. Тепловые свойства газов**

**Теплоемкость**. Для газов различают теплоемкость, определяемую при постоянном давлении (изобарная теплоемкость) *ср* и при постоянном объеме (изохорная теплоемкость) *сv*. Эти теплоемкости идеальных газов связаны между собой соотношением *с0р – с0v= R*. Здесь индекс 0 означает нормальное давление. Как и для жидких нефтепродуктов, теплоемкость газов может быть молярной, массовой и объемной.

В технологических расчетах преимущественно используются изобарные теплоемкости газов, значения которых при нормальных условиях приведены в прил.1. Теплоемкость газов слабо зависит от давления, обычно этим влиянием в расчетах пренебрегают. При повышении температуры теплоемкость газов увеличивается. Однако в меньшей степени, чем для жидких нефтепродуктов.

На рис. 3.1 приведен график зависимости теплоемкости *ср*углеводородных газов и нефтяных паров от их относительной плотности и температуры.

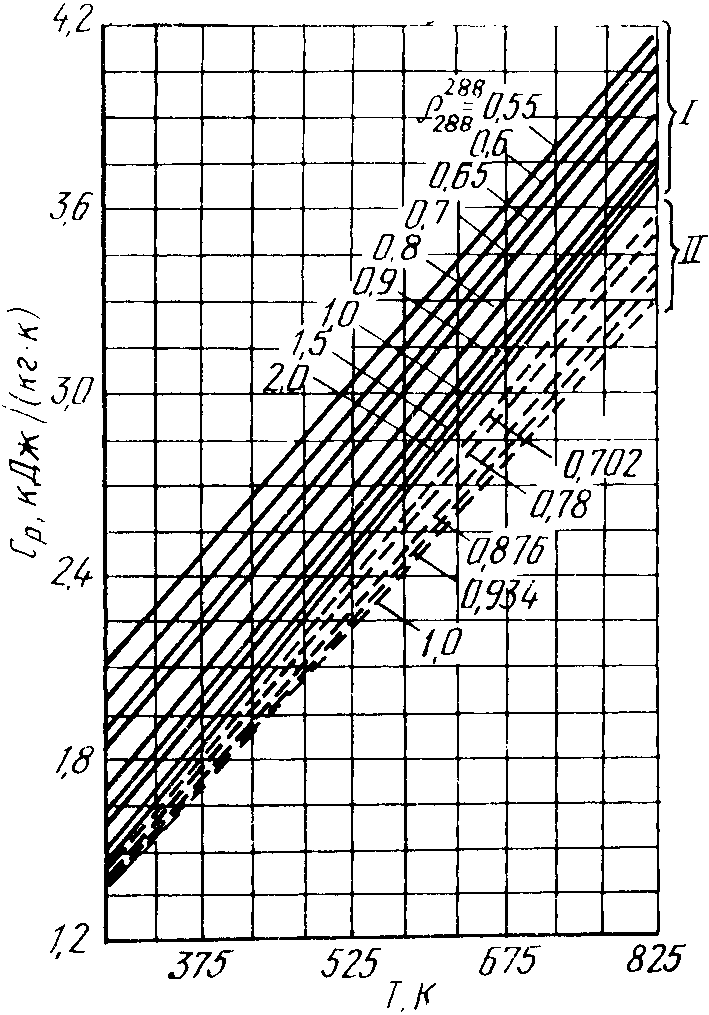


Рисунок 3.1 - Зависимость теплоемкости паров углеводородов от

температуры и их плотности по отношению к воздуху (I) и от паров жидких углеводородов по отношению к воде (II)

Приближенно теплоемкость насыщенных газообразных углеводородов в килоджоулях на киломоль-кельвин можно определить, как функцию числа углеводородных атомов *Nс* в молекуле с учетом температуры:

*Т* [1]: *ср* = 16,74 + 5,44*Nс* + 0,05*NcТ* (3.1).

Теплоемкость реальных газов рассчитывается по формуле

 (3.2)

где  – изобарная теплоемкость газа или газовой смеси в расчете на идеальный газ, кДж/(кг·К); поправка к теплоемкости, учитывающая неидеальность газа, кДж/(кг·К).

Теплоемкость газов (как идеальных) определяется по уравнению

 (3.3)

где *Е, F, G, Н, N* – коэффициенты.

Значения коэффициентов *F, G, H, N* приведены в табл.3.1. Для рассматриваемых газов *Е* = 0.

Таблица 3.1 -Значения коэффициентов к уравнению (3.3), кДж/(кг·К)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Газы | *F*·102 | -*G*·103 | *Н*·105 | *N*·10 |
| Водород | 329,83 | 294,05 | 940,12 | 200,39 |
| Кислород | 21,62 | 16,46 | 45,44 | 12,05 |
| Азот | 21,74 | 16,13 | 45,18 | 15,43 |
| Оксид углерода | 22,07 | 16,19 | 44,59 | 15,20 |
| Диоксид углерода | 25,75 | 19,43 | 53,59 | 6,92 |
| Диоксид серы | 19,10 | 15,48 | 43,24 | 5,11 |
| Сероводород | 24,41 | 16,68 | 45,82 | 11,68 |
| Водяной пар | 40,15 | 27,80 | 79,22 | 26,41 |
| Метан | 58,43 | 15,19 | -2,94 | 18,55 |
| Этилен | 58,31 | 31,71 | 68,49 | 2,36 |
| Этан | 62,46 | 25,62 | 35,94 | 3,34 |
| Пропилен | 57,38 | 28,87 | 56,17 | 1,54 |
| Пропан | 66,22 | 32,71 | 62,19 | -0,78 |
| Бутилен | 61,06 | 33,12 | 70,58 | -0,50 |
| Бутан | 65,71 | 33,13 | 64,19 | 0 |
| Пентан | 65,66 | 33,76 | 66,84 | -6,11 |

Поправка теплоемкости на давление рассчитывается по формуле:

 (3.4)

где поправки, определяемые по графикам (прил.2 и 3) в зависимости от приведенных давления и температуры; *ω* - фактор ацентричности.

Фактор ацентричности *ω* находится приближенно по формуле *ω*=0,1745+0,0838*Тпр* или по табл.3.2

Таблица 3.2 -Значения фактора ацентричности для некоторых газов

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Газ | *ω* | Газ | *ω* |
| Водород | 0,0 | Метан | 0,0104 |
| Диоксид углерода | 0,2310 | Этан | 0,0986 |
| Сероводород | 0,1000 | Пропан | 0,1524 |
| Диоксид серы | 0,2460 | Бутан | 0,2010 |
| Водяной пар | 0,3480 | Пентан | 0,2539 |

Фактор ацентричности газовых смесей подсчитывается по правилу аддитивности, состав смеси при этом выражается в молярных долях. Правило аддитивности действует и при расчете теплоемкости газовой смеси.

Пример 3.1. Относительная плотность углеводородного газа по воздуху равна 1,25. Определить теплоемкость газа при 102°С.

Решение. Воспользуемся графиком на рис.3.1. на оси абсцисс отложим значение температуры: 102+273 = 375 К и восстановим перпендикуляр до пересечения ,с воображаемой сплошной линией, имеющей значение 1,25 и лежащей на равном удалении от линий 1,00 и 1,50. Точку пересечения перенесем на ординату и получим *ср*=1,93 кДж/(кг⋅К).

Пример 3.2. Рассчитать теплоемкость газовой смеси при 40°С и 9,5 МПа, состав которой (в объемных долях): метана – 0,8 и этана – 0,2.

Решение. Выразим состав смеси в молярных и массовых долях, которые потребуются для дальнейших расчетов. Объемный и молярный составы газовых смесей равны, поэтому для метана  для этана  Массовые доли будут равны для метана:



для этана:



Знаменатель приведенных выше выражений представляет собой среднюю молярную массу смеси *М* = 0,8⋅16 + 0,2⋅30 = 18,8 кг/кмоль.

Поскольку смесь находится под повышенным давлением, ее теплоемкость следует определять как для реального газа по формуле (3.2). Определим прежде изобарную теплоемкость  по формуле (3.3), взяв коэффициенты из табл.3.1.

Для метана



Для этана



Подсчитаем  газовой смеси, используя массовые доли,



Выпишем из табл. 3.2 и прил. 1 характеристики метана и этана:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | *Ткр*, К | *ркр*, МПа | *ω* |
| Метан | 190,5 | 4,70 | 0,0104 |
| Этан | 305,5 | 4,89 | 0,0986 |

Определим эти характеристики для заданной смеси по содержанию компонентов, выраженному в молярных долях:

Ткр= 0,8⋅190,5+0,2⋅305,5 = 213,5 К;

ркр= 0,8⋅4,7+0,2⋅4,89 = 4,74 МПа;

ω= 0,8⋅0,0104+0,2⋅0,0986 = 0,028.

Найдем приведенные параметры смеси:

По прил.2 и 3, используя приведенные параметры, определим значения поправок  и  :  

Вычислим поправку теплоемкости на давление по формуле (3.4):



Окончательно теплоемкость смеси с учетом поправки определится по формуле (3.2):

*ср*=2,13-(-0,85)=2,98 кДж/(кг⋅К).

**Энтальпия**. Энтальпия газов или паров при заданной температуре *Т* численно равна количеству теплоты в джоулях (килоджоулях), которое необходимо затратить на нагрев единицы количества вещества от температуры *Т1* до *Т2* с учетом теплоты испарения и перегрева газов или паров.

Энтальпия идеального газа ( кДж/кг) при температуре *Т* и атмосферном давлении рассчитывается по уравнению: 

где *А*, *В*, *С*, *D* – коэффициенты, значения которых для газов приведены в табл. 3.3.

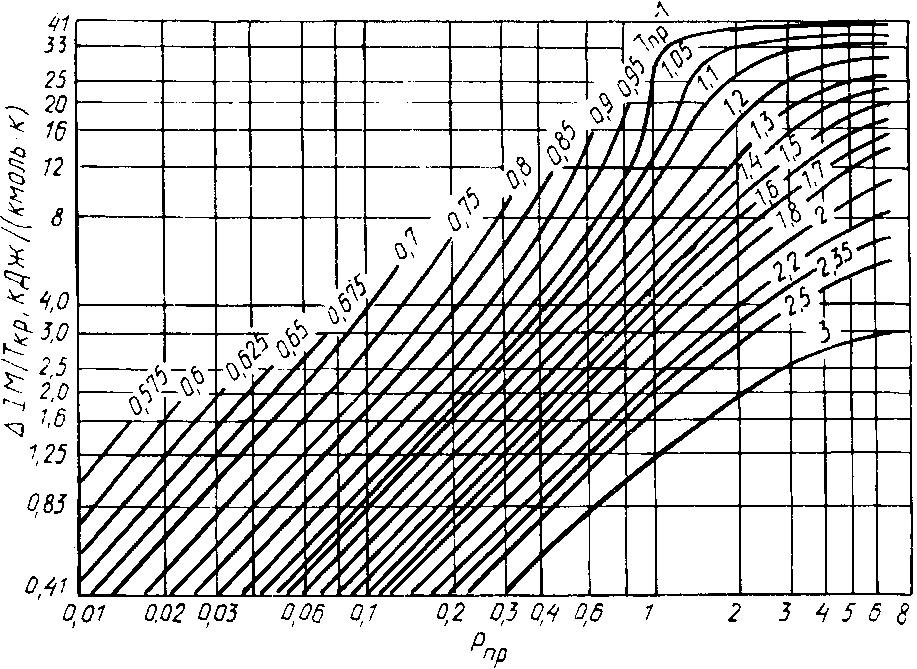
Энтальпия нефтяных паров и углеводородных газов с повышением давления снижается. Разность энтальпий при атмосферном и повышенном давлении  является функцией приведенных температуры и давления  и определяется по графикам (рис.13). По известной поправке  находится энтальпия при повышенном давлении : 

Таблица 3.3 -Значения коэффициентов к уравнению (3.10), кДж/кг

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Газы | А | В | С | D |
| Водород | 82,27 | 2,54 | 0,013 | 25,12 |
| Кислород | 82,72 | 1,87 | 0,032 | 24,37 |
| Диоксид углерода | 58,62 | 5,05 | 0,012 | -11,08 |
| Сероводород | 1429,21 | -1,32 | 0,316 | -167,44 |
| Метан | 154,15 | 15,12 | 0,051 | 59,62 |
| Этилен | 66,94 | 18,77 | 0,352 | 49,12 |
| Этан | 58,65 | 23,63 | 0,414 | 56,15 |
| Пропилен | 40,57 | 21,94 | 0,450 | 52,30 |
| Пропан | 33,65 | 26,31 | 0,538 | 35,58 |
| Бутилен | 35,38 | 23,15 | 0,491 | 25,63 |
| *изо*-Бутан | 27,32 | 27,08 | 0,583 | 12,74 |
| *н*-Бутан | 34,72 | 26,08 | 0,545 | 39,22 |
| *изо*-Пентан | 26,69 | 26,84 | 0,574 | 11,61 |
| *н*-Пентан | 33,59 | 25,99 | 0,550 | 28,21 |

Энтальпия смеси газов или паров, как и теплоемкость, рассчитывается по правилу аддитивности (рис.3.2).

а)



б)

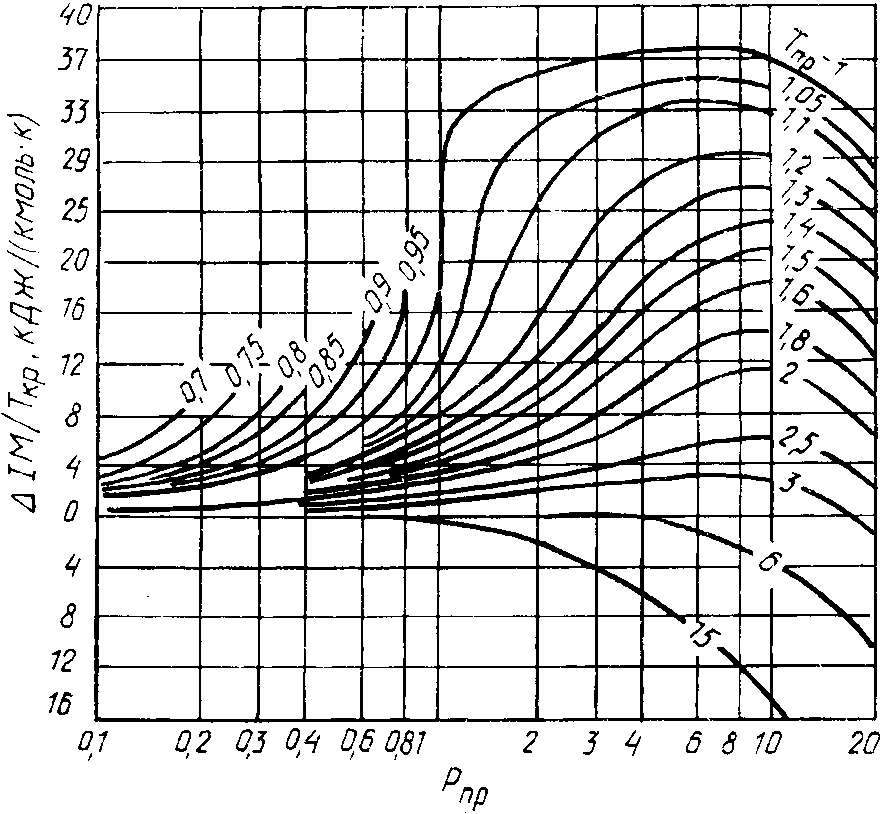


Рисунок 3.2 – График для определения энтальпии нефтяных паров: *а* )– в узком интервале приведенных температуры и давления; *б)* – в широком интервале приведенных температуры и давления.

Пример 3.3. Определить энтальпию паров пропана при 60°С и 1,15 МПа.

Решение. Энтальпию пропана при атмосферном давлении определим по уравнению (3.5), допустив, что пропан является идеальным газом,

 (3.5)

Найдем приведенные параметры пропана, взяв критические температуру и давление из прил.1:

По графику (см. рис.3.2) определим поправку к энтальпии = 4. Отсюда 

Энтальпия при заданных условиях будет равна



**Задачи**

1. Относительная плотность сухого газа по воздуху равна 0,76. Найти его теплоемкость при 80°С.

2. Определить теплоемкость газовой смеси при 150°С, если ее относительная плотность 1,1.

3.Используя график (см. рис.12), найти теплоемкость паров нефтяной фракции () при 250°С.

4. Найти теплоемкость пропана при 72°С и атмосферном давлении.

5. Полагая этан идеальным газом, определить его теплоемкость при 110°С и атмосферном давлении.

6. Найти молярную теплоемкость бутана при 150°С и 101,3 кПа.

7. По данным прил.10 определить теплоемкость смеси при нормальных условиях, объемное содержание в которой метана – 30%, этилена – 60%, этана – 10%.

8. Пропан-пропиленовая фракция состоит из 35% пропана и 65% пропилена. Определить ее теплоемкость при 149°С и 1,57 МПа.

9. Найти энтальпию этилена при 107°С, считая его идеальным газом.

10. Какова энтальпия этана при 160°С, если принять, что он подчиняется законам идеального состояния?

11. Определить энтальпию водородсодержащего газа при 250°С и атмосферном давлении. Состав газа (в объемных процентах): водород – 80; метан – 15; этан – 5.

12.Найти энтальпию пропан – бутановой смеси (соотношение пропан – бутан = 4:1 по объему) при 89°С и 0,84 МПа.

13. Какое количество теплоты потребуется для нагрева от 20 до 60°С 1000 кг газовой смеси, массовая доля метана в которой равна 0,67 и этана – 0,33? Нагрев осуществляется при атмосферном давлении.

14.Объемное содержание метана, этана и сероводорода в сухом газе составляет соответственно 75, 15 и 10%. Рассчитать количество теплоты, которое выделится при охлаждении 1 кг этого газа с 90 до 30°С при атмосферном давлении.

## 

## **Тема 4. Сжиженные углеводородные газы**

**Теплота испарения**. Теплота испарения, называемая также теплотой парообразования или энтальпией испарения, для многих газов является известной величиной. В табл.4.1 приведены значения удельной теплоты испарения индивидуальных углеводородов при нормальном давлении и температуре кипения и некоторые другие их характеристики.

Таблица 4.1 -Характеристика углеводородных газов

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Газы | Температура кипения, К | Удельная теплота испарения, кДж/кг | Удельный объем при нормальных условиях, м3/кг | Молярный объем при нормальных условиях, м3/кмоль |
| Метан | 111,6 | 518,1 | 1,39 | 22,38 |
| Этилен | 169,4 | 481,6 | 0,79 | 22,25 |
| Этан | 184,6 | 486,2 | 0,74 | 22,18 |
| Пропилен | 225,5 | 440,2 | 0,52 | 21,97 |
| Пропан | 231,1 | 425,9 | 0,49 | 21,64 |
| *изо*-Бутилен | 266,2 | 397,0 | 0,40 | 22,42 |
| *изо*-Бутан | 261,5 | 366,0 | 0,37 | 21,64 |
| *н*-Бутан | 272,7 | 387,8 | 0,37 | 21,46 |
| *изо*-Пентан | 301,1 | 342,6 | 0,29 | 21,03 |
| *н*-Пентан | 309,3 | 257,7 | 0,29 | 20,87 |

Повышение температуры приводит к уменьшению теплоты испарения, и в критическом состоянии, когда может существовать только паровая фаза, теплота испарения равна нулю. Используя данные табл.4.1, теплоту испарения *Lт* при любой температуре *Т* легко определить по формуле

*Lт=βL0Т/Т0,* (4.1)

где *β* – температурная поправка; *L0* – теплота испарения при нормальной температуре кипения ( табл.4.1).

Температурная поправка *β* определяется по графику (рис.4.1) в зависимости от приведенной температуры и отношения *Т0/Ткр*.

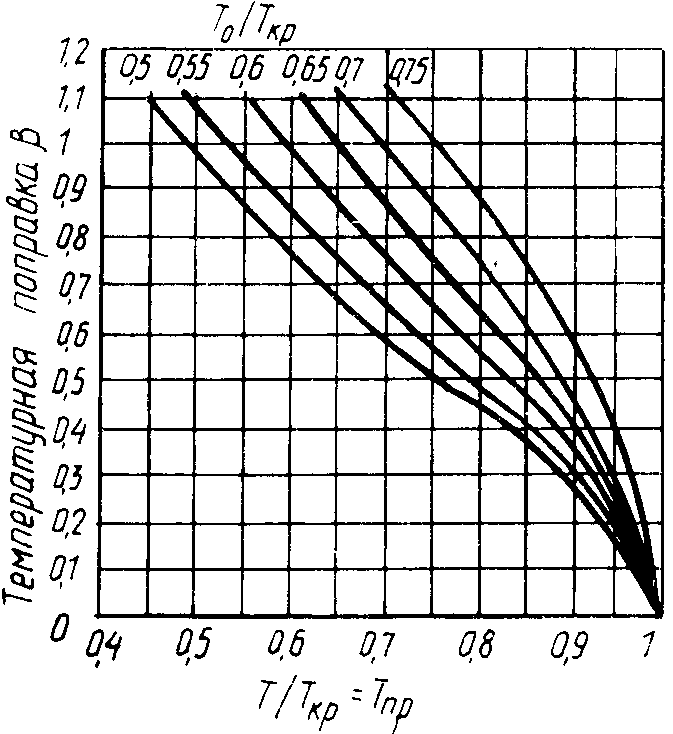


Рис. 4.1 – График для определения температурной поправки к теплоте испарения

С ростом давления теплота испарения также уменьшается. Оценить это влияние можно по формуле Трутона

 (4.2)

где *Ткип* – температура кипения углеводорода, К; *κ/* – постоянная, определяемая по графику (рис. 4.2) как функция отношения 0,0102*р/Т*; *р* – давление в системе, Па; *Т* – температура в системе, К.

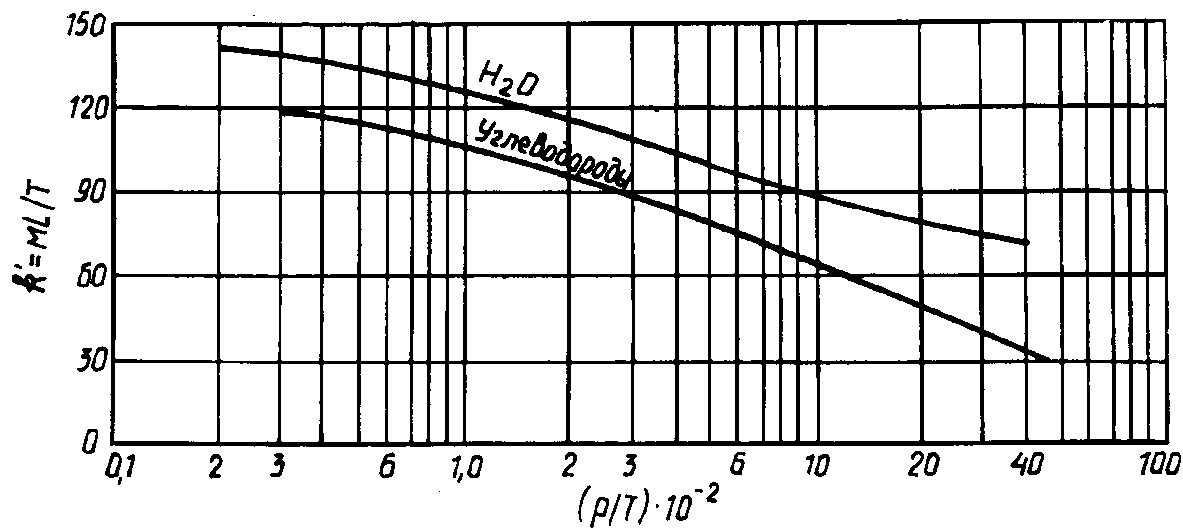


Рис. 4.2– График для определения постоянной k/ в формуле Трутона

для расчета теплоты испарения

Формула Трутона дает возможность подсчитать теплоту испарения в килоджоулях на килограмм не только индивидуальных углеводородов, но и их смесей.

При работе со сжиженными газами важно знать объем газовой фазы *Vг*, получающийся при их испарении. Его определяют по формуле:

***Vг=NVм,***  (4.3)

где *N* – количество жидкой фазы, кмоль; *Vм* – молярный объем углеводорода (табл. 4.1), м3/кмоль.

Для технических сжиженных газов значение *Vм* принимается равным 21,6 м3/кмоль.

Объем паров, получаемый при испарении 1 м3 сжиженного газа, определяется:

**** (4.4)

где *ρж* – плотность жидкой фазы, кг/м3.

Если расчет ведется для смеси газов, нужно использовать правило аддитивности.

Пример 4.1. Определить теплоту испарения пропана при 10°С (283 К) и 7⋅105 Па.

Решение. Для подсчета теплоты испарения воспользуемся формулой Трутона. Температура кипения пропана (табл.7) равна 231,1 К, его молярная масса 44 кг/кмоль. Чтобы найти постоянную k| по графику (рис.15), рассчитаем функцию:

.

На оси абсцисс графика (рис.15) отложим число 25,2 и через кривую "углеводороды" перенесем на ось ординат. Получим *k|*≈45. Теплота испарения

.

Пример 4.2. Рассчитать объем паров, получаемых при испарении 10 кг пропан-бутановой смеси, содержащей (в объемных долях): пропана – 0,8 и *н*-бутана – 0,2.

Решение. Определим среднюю молярную массу смеси, имея в виду, что объемные доли равны молярным: *М* = 0,8⋅44+0,2⋅58=46,8

Запишем формулу (29) в виде: 

Для упрощения расчетов примем *VМ*=21,6 м3/кмоль. ,

тогда 

**Теплота сгорания**. Теплотой сгорания называют количество теплоты, выделяемое при сжигании топлива. В СИ удельную теплоту сгорания измеряют в джоулях на килограмм и кратных единицах. В технологических расчетах используют иногда молярную (килоджоуль на киломоль) и объемную (килоджоуль на кубический метр) теплоту сгорания. Различают высшую и низшую теплоты сгорания. Первая учитывает теплоту, выделяемую дымовыми газами при их охлаждении, а также теплоту конденсации образующихся при сгорании водяных паров, вторая – нет. Другими словами, низшая теплота сгорания меньше высшей на величину указанной теплоты. На практике продукты сгорания обычно не охлаждаются до температуры конденсации водяных паров, поэтому в расчетах пользуются низшей теплотой сгорания , рассчитанной на рабочий состав топлива. Численные значения теплот сгорания некоторых газов при нормальных условиях  приведены в табл.4.2.

Таблица 4.2 -Низшая теплота сгорания  горючих газов

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Газы | Молярная, кДж/моль | Удельная, кДж/кг | Объемная, кДж/м3 |
| Метан | 800 931 | 49 933 | 35 756 |
| Этилен | 1 333 518 | 47 540 | 59 532 |
| Этан | 1 425 799 | 47 415 | 63 652 |
| Пропилен | 1 937 450 | 46 042 | 86 493 |
| Пропан | 2 041 491 | 46 302 | 91 138 |
| *изо*-Бутан | 2 648 361 | 47 208 | 118 230 |
| *н*-Бутан | 2 655 060 | 47 327 | 118 530 |
| *изо*-Пентан | 3 266 404 | 45 272 | 145 822 |
| *н*-Пентан | 327 401 | 45 383 | 146 178 |
| Водород | 241 159 | 119 622 | 10 766 |
| Оксид углерода | 283 577 | 10 124 | 12 660 |
| Сероводород | 525 142 | 15 408 | 23 444 |

Теплота сгорания смеси горючих газов  определяется по правилу аддитивности:  (4.5)

В практической работе часто используют смеси паров сжиженных углеводородных газов с воздухом. Теплоту сгорания таких пропано- и бутано-воздушных смесей можно определить по графику (рис.16).

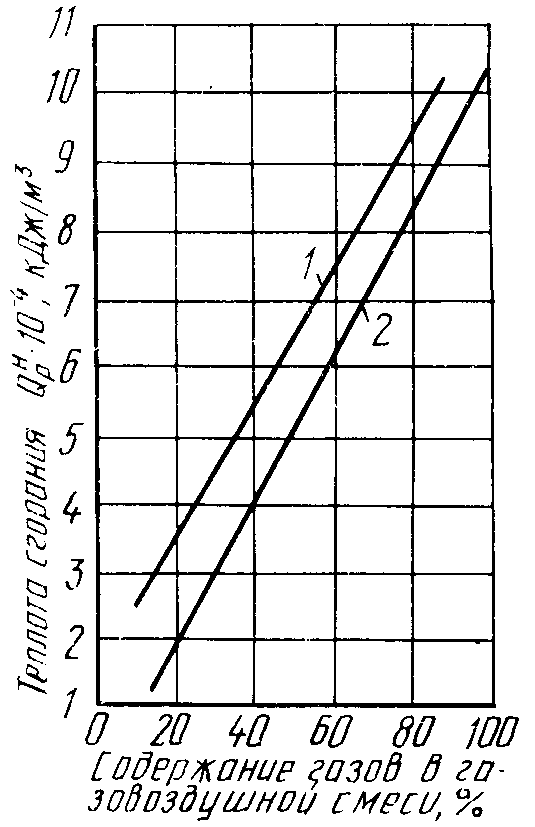


Рисунок 4.3 – Изменение теплоты сгорания газовоздушных смесей в зависимости от содержания в них горючих газов: 1 – бутан; 2 – пропан

Пример 4.3. Подсчитать удельную теплоту сгорания  топливного газа. Состав газа (в массовых долях): метан – 0,83, этан – 0,09, пропан – 0,08.

Решение. Расчет объемной теплоты сгорания проводим по правилу аддитивности, используя данные табл.8,

=0,83⋅49933+0,09⋅47415+0,08⋅46302=49416 кДж/кг.

**Горение горючих газов**. Для поддержания нормального горения газообразного или другого топлива необходим кислород или воздух. Теоретический объем *VТ* кислорода или воздуха рассчитанный по стехиометрическим уравнениям горения различных газов, приведен в табл.9.

Для смеси газов теоретических объем кислорода или воздуха подсчитывается по правилу аддитивности.

В промышленных условиях обычно используется воздух, реальное количество которого берется несколько больше теоретического, чтобы обеспечить наилучшую полноту сгорания. Отношение реального объема воздуха *Vp* к теоретическому называют *коэффициентом избытка воздуха* *α=Vp/VТ*. Коэффициент избытка воздуха для газообразного топлива принимают равным 1,05-1,2.

Объем и состав продуктов сгорания, образующихся при горении газов с теоретически необходимым объемом воздуха, приведены в табл.4.4.

Объемы воздуха и продуктов сгорания в табл.4.3 и 4.4 приведены для нормальных условий (101,3 кПа, 273 К). Если фактические условия горения отличаются от нормальных, объемы следует пересчитать по одному из законов состояния газа.

Таблица 4.3 -Теоретический объем кислорода и воздуха при сжигании1 м3 газа, м3

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Газ | Кислород | Воздух | Газ | Кислород | Воздух |
| Метан | 2,0 | 9,53 | Бутаны | 6,5 | 30,90 |
| Этилен | 3,0 | 14,28 | Пентаны | 8 | 38,08 |
| Этан | 3,5 | 16,66 | Водород | 0,5 | 2,38 |
| Пропилен | 4,5 | 21,42 | Оксид углерода | 0,5 | 2,38 |
| Пропан | 5 | 23,8 | Сероводород | 1,5 | 7,14 |
| Бутилен | 6 | 28,56 |  |  |  |

Таблица 4.4 -Состав и объем продуктов сгорания, образующихся при горении 1 м3 газа, м3

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Газ | Диоксид углерода | Водяной пар | Азот | Всего продуктов сгорания | Максимальное содержание СО2, % |
| Метан | 1 | 2 | 7,50 | 10,50 | 11,8 |
| Этилен | 2 | 2 | 11,28 | 15,28 | 15,0 |
| Этан | 2 | 3 | 13,16 | 18,16 | 13,2 |
| Пропилен | 3 | 3 | 16,92 | 22,92 | 15,0 |
| Пропан | 3 | 4 | 18,80 | 25,80 | 13,8 |
| Бутилены | 4 | 4 | 22,56 | 30,56 | 15,0 |
| Бутаны | 4 | 5 | 22,40 | 33,40 | 14,0 |
| Пентаны | 5 | 6 | 30,08 | 41,08 | 15,0 |
| Водород | - | 1 | 1,88 | 2,88 | - |
| Оксид углерода | 1 | - | 1,88 | 2,88 | 34,7 |
| Сероводород | 1 | 1 | 5,64 | 7,64 | - |

Пример 4.4. Сжигают 350 м3 газа, состав которого (в объемных долях) следующий: метан – 0,60; этан – 0,10; водород – 0,274; этилен – 0,03. Коэффициент избытка воздуха – 1,12. Определить действительный объем воздух, необходимого для сжигания газа.

Решение. По правилу аддитивности найдем теоретический объем теоретический объем воздуха на 1 м3 газа, используя данные табл.9.

Vт=0,6⋅9,53+0,1⋅16,66+0,27⋅2,38+0,03⋅14,28=8,45 м3.

С учетом коэффициента избытка воздуха реальный объем воздуха составит

Vр= 1,12⋅8,45 = 9,46 м3.

В практике сжигания топлива используется понятие жаропроизводительной способности или жаропроизводительности, которая представляет собой температуру, развиваемую при полном сгорании топлива с теоретическим количеством воздуха без учета тепловых потерь и при начальной температуре топлива и воздуха 0°С (273 К).

Значения жаропроизводительности различных горючих газов приведены в табл.4.5. Для смеси газов жаропроизводительность (*tmax*, °С) определяется по формуле:

, (4.6)

где  – объемная теплота сгорания смеси газов, кДж/м3; *Vc* – объем продуктов полного сгорания топлива с теоретически необходимым объемом воздуха, м3; *ср* – средняя теплоемкость продуктов сгорания, подсчитанная в интервале температур от °С до *tmax*, кДж/(м3⋅К). Знаменатель выражения (4.6) может быть подсчитан по правилу аддитивности.

Таблица 4.5 - Жаропроизводительность горючих газов

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Газ | Максимальное содержание СО2 при сжигании газа в воздухе, % | Жаропроизводительность, °С | Газ | Максимальное содержание СО2 при сжигании газа в воздухе, % | Жаропроизводительность, °С |
| Метан | 11,8 | 2040 | Бутан | 14,0 | 2120 |
| Этилен | 15,0 | 2280 | Пентан | 14,2 | 2235 |
| Этан | 13,2 | 2100 | Водород | - | 2235 |
| Пропилен | 15,0 | 2225 | Оксид углерода | 34,7 | 2370 |
| Пропан | 13,8 | 2110 | Природный | 11,8 | 2040 |
| Бутилен | 15,0 | 2200 | Попутный | 13,0 | 2030 |

## **Задачи**

1. Определить теплоту испарения *изо*-бутана при 20°С и нормальном давлении.

2. Какова теплота испарения пропан-пропиленовой смеси (соотношение пропан: пропилен = 3:1 по массе) при температуре минус 50°С и атмосферном давлении?

3. Найти теплоту испарения этана при 3,2 МПа.

4. В бытовом сжиженном газе содержание пропана составляет 80%, бутана – 20%.Найти теплоту его испарения при минус 5°С и 1,1⋅106 Па.

5.Определить теплоту испарения *изо*-пентана при 67°С и 6,2⋅105 Па.

6.Рассчитать объем паров, получаемых при испарении 50 кг *изо*-пентана.

7.Определить объем паров, получаемых при испарении 120 кг/ч *изо*-бутан- бутановой смеси.

8.Найти теплоту сгорания пропан-бутановой смеси, объемное содержание в которой составляет 78% пропана и 22% *н*-бутана.

9. Найти теплоту сгорания пропан воздушной смеси, в которой содержится 60% пропана.

10.Какова теплота сгорания метана при 155 кПа и 35°С?

11. Газ Ямбургского месторождения характеризуется объемным содержанием компонентов: метан – 89,6%; этан – 5,9%; пропан – 2,4%; бутан и выше – 1,1%; инертные газы – 1,0%. Рассчитать теплоту сгорания газа.

12. Определить теоретический расход воздуха, необходимого для сжигания 1 м3 метан водородной смеси (4:1 по объему).

13. Для сгорания газообразного топлива (объемное содержание: 95% метана и 5% этана) подается воздух в количестве 10,58 м3 на 1 м3. Найти коэффициент избытка воздуха.

14. Вычислить объем продуктов сгорания при сжигании 1 м3 пропан-бутановой смеси (1:1 по объему), которые имеют температуру 250°С.

15. Найти жар производительность пропан-бутановой смеси, состоящей из 79% пропана и 21% бутана (по объему).

16. Какова жар производительность топливного газа, состав которого (в объемных долях) следующий: метан – 0,65; этан – 0,25; водород – 0,10?

# Перечень теоретических вопросов для подготовки к экзамену по «ХПУГ»

1. Газообразное топливо: общая характеристика, классификация. Возможные пути происхождения УВ газов.
2. Природный и попутный газ: сходства, различия.
3. Основные свойства газов. Основные характеристики газообразного топлива.
4. Получение газа методом сухой перегонки.
5. Классификация газообразного топлива. Краткая характеристика продуктов.
6. Требования к качеству товарных газов. Методы анализа товарных газов (указать допустимые значения по каждому анализируемому показателю). Источники и негативные последствия присутствия в газах примесей.
7. Очистка газов от механических примесей. Методы очистки газов от механических примесей.
8. Устройства для механической очистки газов от твердых частиц: пылеосадительные камеры, инерционные пылеуловители.
9. Устройства для механической очистки газов от твердых частиц: циклоны, аппараты мокрой очистки газов от твердых частиц.
10. Устройства для механической очистки газов от твердых частиц: фильтры.
11. Осушка природных углеводородных газов. Объяснить необходимость процесса осушки. Основные определения.
12. Классификация методов осушки углеводородных газов.
13. Адсорбционная осушка (схема). Факторы, влияющие на осушку.
14. Промышленная установка осушки газа (схема).
15. Осушка газа впрыском гликоля (схема).
16. Очистка газов от химических примесей. Методы очистки газов от кислых компонентов.
17. Схема очистки газов от диоксида углерода МЭА.
18. Очистки газов от диоксида углерода: адсорбция, каталитическое гидрирование.
19. Основные критерии выбора адсорбента в очистке газов.
20. МЭА или ДЭА?
21. Принципы технологии очистки от H2S.
22. Очистка газов от тиолов.
23. Основные способы удаления сернистых газов.
24. Основные способы удаления оксидов азота.
25. Производство серы из сероводородсодержащих газов по методу Клауса.
26. Доочистка отходящих газов процесса Клауса
27. Товарные формы, области применения серы
28. Низкотемпературная сепарация.
29. Факторы, влияющие на процесс НТС.
30. Методы извлечения углеводородов С2-С5 из природных газов. Схема процесса масляной абсорбции.
31. Низкотемпературная абсорбция.
32. Низкотемпературная конденсация.
33. Способы получения «холода». Установка ПХМ.
34. Способы получения «холода». Установка АХМ.
35. Получения глубокого холода.

**Перечень использованных информационных источников**

1. Лапидиус А.Л., Голубева А.Л., Жагфаров Ф.Г. «Газохимия»: Учебное пособие. - М: ЦентрЛит- НефтеГаз. - 2008. - 450 с. -
2. С.В. Вержичинская «Химия и технология нефти и газа»: Учебное пособие. - М.: Форум,2009. - 400 с.
3. Ахметов С.А. Технология глубокой переработки нефти и газа: Учебное пособие для вузов.-Уфа: Гилем, 2002.-672 с.
4. Рябов А.А. Химия нефти и газа. М.: ГНУ им. Губкина. 2005.
5. Хорошко С.И., Хорошко А.Н. Сборник задач по химии и технологии нефти и газа. Учеб. пособие для сред. спец. учеб. заведений. — Мн.: Выш. шк., 1989.
6. Скобло А.И., Трегубова И.А., Молоканов Ю.К. Процессы и аппараты нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. - 2-е изд., перераб. и доп.-М.: Химия. 1982.-584 с.
7. Мановян А.К. Технология первичной переработки нефти и природного газа: Учебное пособие для вузов.-М.: Химия, 2001.-568 с.
8. Гуревич И.А. Общие свойства и первичные методы переработки нефти и газа. -М.: Химия, 1972.-360 с.
9. Сарданашвили А.Г., Львова А.И. Примеры и задачи по технологии переработки нефти и газа. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Химия,-1980.-256 с.

# Варианты контрольной работы

**Контрольные задания**

Каждый студент в течение межсессионного периода (семестра) выполняет контрольную работу. Вариант заданий контрольной работы соответствует порядковому номеру в экзаменационной ведомости отчетного семестра. Варианты для контрольной работы и соответствующие им задания представлены в таблице ниже. По каждому из разделов – 2 задачи (итого: 8 задач) и 2 теоретических вопроса из перечня вопросов для подготовки к экзамену.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер варианта | Номера задач, относящихся к данному варианту | | | | | | | | | |
| Тема 1 | | Тема 2 | | Тема | | Тема | | Теоретические вопросы | |
| 1 | 1 | 13 | 1 | 13 | 1 | 14 | 1 | 16 | 1 | 35 |
| 2 | 2 | 12 | 2 | 12 | 2 | 12 | 2 | 15 | 2 | 34 |
| 3 | 3 | 11 | 3 | 11 | 3 | 11 | 3 | 14 | 3 | 33 |
| 4 | 4 | 10 | 4 | 10 | 4 | 10 | 4 | 10 | 4 | 32 |
| 5 | 5 | 9 | 5 | 9 | 5 | 9 | 5 | 9 | 5 | 31 |
| 6 | 6 | 12 | 6 | 12 | 6 | 12 | 6 | 12 | 6 | 30 |
| 7 | 7 | 11 | 7 | 11 | 7 | 11 | 7 | 11 | 7 | 29 |
| 8 | 8 | 10 | 8 | 10 | 8 | 10 | 8 | 10 | 8 | 28 |
| 9 | 9 | 1 | 9 | 1 | 9 | 1 | 9 | 1 | 9 | 27 |
| 10 | 10 | 2 | 10 | 2 | 10 | 2 | 10 | 2 | 10 | 26 |
| 11 | 11 | 3 | 11 | 3 | 11 | 3 | 16 | 3 | 11 | 25 |
| 12 | 12 | 4 | 12 | 4 | 12 | 4 | 12 | 4 | 12 | 24 |
| 13 | 13 | 5 | 13 | 5 | 13 | 5 | 13 | 5 | 13 | 22 |
| 14 | 1 | 6 | 1 | 6 | 14 | 6 | 15 | 6 | 14 | 21 |
| 15 | 5 | 7 | 5 | 7 | 5 | 7 | 14 | 7 | 15 | 17 |

## **Приложение 1 - Физико-химическая характеристика газов**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Газ | Плотность при нормальных условиях (101,3 кПа, 273 К) | | | Температура кипения при 101,3 кПа | | Критическая температура | | Критическое давление, МПа | Критическая плотность, кг/м3 | Динамическая вязкость при нормальных условиях 0106, Пас | Теплоемкость при нормальных условиях | | |
| в жидком состоянии, кг/л | в газообразном состоянии, кг/м3 | по воздуху | °С | К | °С | К |  |  |  |
| Метан | 0,3042 | 0,7168 | 0,5544 | - 161,8 | 111,4 | - 82,7 | 190,5 | 4,70 | 162 | 10,27 | 2,18 | 1,56 | 34,97 |
| Этилен | 0,3961 | 1,2605 | 0,9750 | -103,7 | 169,5 | 9,5 | 282,7 | 5,12 | 220 | 9,41 | 1,47 | 1,85 | 41,24 |
| Этан | 0,3722 | 1,3560 | 1,0489 | -88,7 | 184,5 | 32,3 | 305,5 | 4,89 | 212 | 8,66 | 1,67 | 2,26 | 50,21 |
| Пропилен | 0,5455 | 1,9149 | 1,4812 | -47,7 | 225,5 | 91,9 | 365,1 | 4,66 | 233 | 7,84 | 1,46 | 2,80 | 61,43 |
| Пропан | 0,5011 | 2,0037 | 1,5499 | -42,1 | 231,1 | 96,8 | 370,0 | 4,32 | 225 | 7,50 | 1,57 | 3,15 | 69,23 |
| изо-Бутилен | 0,6180 | 2,5022 | 1,9355 | -6,9 | 266,3 | 144,7 | 417,9 | 4,02 | 234 | 7,32 | 1,54 | 3,85 | 86,40 |
| изо-Бутан | 0,5810 | 2,6751 | 2,0770 | -11,7 | 261,5 | 135,0 | 408,2 | 3,69 | 221 | 6,89 | 1,55 | 4,16 | 90,09 |
| н-Бутан | 0,6010 | 2,7023 | 2,0903 | -0,5 | 272,7 | 152,0 | 425,2 | 3,85 | 228 | 6,82 | 1,57 | 4,24 | 91,25 |
| изо-Пентан | 0,6392 | 3,4302 | 2,6533 | 27,9 | 301,1 | 187,8 | 461,0 | 3,38 | 234 | 6,38 | 1,53 | 5,25 | 110,38 |
| н-Пентан | 0,6455 | 3,4570 | 2,6740 | 36,1 | 309,3 | 196,6 | 469,8 | 3,42 | 232 | 6,23 | 1,56 | 5,39 | 112,55 |
| Водород | - | 0,0899 | 0,0695 | -252,8 | 20,4 | -240,2 | 33,2 | 1,33 | 31,6 | 8,40 | 14,21 | 1,28 | 28,64 |
| Азот | - | 1,2505 | 0,9673 | -195,8 | 77,4 | -146,9 | 126,3 | 3,44 | 304 | 16,63 | 1,04 | 1,30 | 29,14 |
| Кислород | - | 1,4290 | 1,1053 | -183,0 | 90,2 | -118,4 | 154,8 | 5,16 | 406 | 19,29 | 0,92 | 1,31 | 29,44 |
| Воздух (сухой) | - | 1,2928 | 1,0000 | -193,0 | 80,2 | -140,7 | 132,5 | 3,76 | 322 | 17,10 | 1,006 | 1,30 | 29,13 |
| Оксид углерода | - | 1,2500 | 0,9669 | -191,5 | 81,7 | -140,0 | 133,2 | 3,54 | 301 | 16,60 | 1,04 | 1,30 | 28,56 |
| Диоксид углерода | - | 1,9769 | 1,5292 | -78,5 | 194,7 | 31,0 | 304,2 | 7,48 | 468 | 13,65 | 0,82 | 1,62 | 36,09 |
| Диоксид серы | - | 2,9266 | 2,2638 | -10,0 | 263,2 | 157,5 | 430,7 | 7,98 | 525 | 11,60 | 0,61 | 1,78 | 39,08 |
| Сероводород | - | 1,5384 | 1,9000 | 46,0 | 319,2 | 100,4 | 373,6 | 8,70 | 348 | 12,50 | 1,03 | 1,58 | 35,10 |
| Водяной пар | - | 0,7680 | 0,5941 | 100,0 | 373,2 | 374,2 | 647,4 | 22,50 | 307 | 8,24 | 2,01 | 1,54 | 36,18 |

## **Приложение 2 – Номограмма для определения поправки ΔСр°к теплоемкости газов**

****

## **Приложение 3- Номограмма для определения к теплоемкости газов**

****

Составители: ЖУКОВА Ирина Юрьевна,

ТЯГЛИВАЯ Инна Николаевна

ФЛИК Евгения Александровна

ОВЧИННИКОВА Ксения Владимировна

Учебное пособие «Химические и физические свойства нефти и газа»

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

В печать

Объем усл. п. л. Офсет. Формат 60х84/16.

Бумага тип №3. Заказ № \_\_\_\_\_\_\_\_\_. Тираж \_\_\_\_ экз. Цена свободная

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Издательский центр ДГТУ

Адрес университета и полиграфического предприятия:

344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1