

Сборник задач и упражнений по курсу Газоснабжение

Хабаровск 2002

Министерство образования
Российской Федерации

Хабаровский государственный технический университет

Сборник задач и упражнений по курсу Газоснабжение

Для студентов специальности 290700

Хабаровск
Издательство ХГТУ
2002

УДК 622.691.4 (4/9) (075.8)

Сборник задач и упражнений по курсу «Газоснабжение»: Методические указания к практическим занятиям для студентов специальности 290700/Сост. Н.И. Фоминцева – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2001. - 32 с.

Методические указания составлены на кафедре теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции. В них приведены задачи проектирования и эксплуатации систем газоснабжения и установок, использующих СУГ и природные газы. Рассмотрены варианты решений. Приводятся некоторые справочные данные и варианты заданий, необходимые для расчетов газопроводов и оборудования на них.

Печатается в соответствии с решениями кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции и методического совета института архитектуры и строительства.

© Издательство Хабаровского
государственного технического
университета, 2002

Практическое занятие 1

Тема: Основные свойства и состав газообразного топлива.

Газообразное топливо представляет собой смесь горючих и негорючих газов, а также примесей. К горючим компонентам относятся все углеводороды: (C_nH_m), водород (H_2) и оксид углерода (CO). Негорючие составляющие или балласт топлива это: азот (N_2), углекислый газ (CO_2) и кислород (O_2). Примеси: водяные пары (H_2O), сероводород (H_2S), аммиак (NH_3), цианистые соединения, смола, пыль и прочие. От вредных примесей газообразное топливо очищают, содержание их нормируется по ГОСТу.

Для газоснабжения населенных пунктов и промышленных объектов применяют сухие и влажные газы. Если газ транспортируется на большие расстояния, его осушают. Искусственные газы в большинстве случаев имеют резкий запах, что облегчает обнаружение утечки газа из труб и арматуры. Природные газы не имеют запаха, поэтому до подачи в систему газоснабжения они одорируются, т.е. им придается резкий и неприятный запах. Самый распространенный одорант - этил меркаптан (C_2H_5SH). К основным характеристикам горючих газов относится теплотворная способность (Q_p^H , кДж/м³) и плотность (ρ , кг/м³).

Основные законы газового состояния

1.2.1 Закон Бойля - Мариотта

При постоянной температуре объем идеального газа изменяется обратно пропорционально давлению, т.е.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{P_2}{P_1} \quad (1.1)$$

отсюда

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = \text{const} \quad (1.2)$$

Здесь V_1 - объем газа при давлении P_1 ; V_2 - объем того же количества газа при давлении P_2 .

Учитывая, что удельные объемы газа обратно пропорциональны плотности, можно написать

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{T_2}{T_1} \quad (1.3)$$

где ρ_1 и ρ_2 - плотности газа соответственно при давлениях P_1 и P_2 .

1.2.2 Закон Гей-Люссака

Объем определенного количества идеального газа при постоянном давлении увеличивается с повышением температуры. Так, если при температуре 0°C газ занимает объем V_0 , м^3 , то при температуре t объем газа составляет

$$V_t = V_0(1 + a_t) \quad (1.4)$$

где a_t - коэффициент расширения газа при повышении температуры на 1°C , приблизительно равно $1/273$.

Для одного и того же газа при постоянном давлении, но различных температурах справедливо соотношение

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1.5)$$

где T - абсолютная температура, равная $273 + t$

Если газ находится в закрытой емкости постоянного объема, то при повышении температуры газа в ней будет возрастать давление, причем

$$P_t = P_0(1 + a_p t) \quad (1.6)$$

где a_p - коэффициент объемного расширения.

Соотношение между абсолютной температурой и давлением для одного и того же количества газа при постоянном объеме будет

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1.7)$$

Для идеальных газов коэффициент a_p и a_t одинаковы.

1.2.3 Закон Авогадро

Равные объемы различных газов при одинаковых температуре, и давлении прямо пропорциональны их молекулярным весам, т.е.

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{M_1}{M_2} \quad (1.8)$$

поскольку

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad \text{и} \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{M_1}{M_2} \quad (1.9)$$

то

$$M_1 V_1 = M_2 V_2 = \text{const} \quad (1.10)$$

Равные объемы разных газов при одинаковой температуре и давлении содержат равное число молекул. Это число для одной моль любого газа составляет $N = 6.025 \cdot 10^{23}$ и называется числом Авогадро. Из этого следует, что при определенной температуре и давлении г/моль любого газа будет занимать почти один и тот же объем, равный частному от деления веса одной г/моль на вес 1 м^3 газа. При 0°C и $P = 1.01 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $MV = 22.4 \text{ м}^3$.

Закон Авогадро позволяет определить плотность любого газа при нормальных условиях по молекулярному весу, кг/нм^3

$$\rho = \frac{M}{V\mu} \quad (1.11)$$

и относительный удельный вес по воздуху

$$S = \frac{M}{1,293} \quad (1.12)$$

где M - молекулярный вес газа, кг

$V\mu$ - молекулярный объем газа, $\text{нм}^3/\text{моль}$

1,293 - удельный вес воздуха, кг/нм^3

1.2.4. Уравнение Клапейрона

$$\frac{PV}{T} = \text{const} \quad (1.13)$$

Обозначая постоянную величину через R , получим для 1 кг газа

$$PV = RT \quad (1.14)$$

Для m кг газа уравнение будет

$$PV = mRT \quad (1.15)$$

где P - давление в Па;

V - объем газа в нм^3 ;

m - масса газа в кг;

R - газовая постоянная в $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

T - абсолютная температура в К.

В газовом хозяйстве рабочим телом является не отдельный однородный газ, а смесь, состоящая из разных газов. Смесь газов, не вступающих между собой в химические соединения, ведет себя, как идеальный газ и подчиняется уравнению состояния (1.15)

Для реальных газов уравнение состояния имеет вид:

$$PV=zmRT \quad (1.16)$$

где z - коэффициент сжимаемости газа.

Каждый близкий по своим свойствам к идеальному газ, входящий в смесь ведет себя так, как если бы в смеси не было других газов: распространяется по всему объему смеси и следует своему уравнению состояния.

Закон Дальтона

Смесь газов подчиняется закону Дальтона, согласно которому общее давление смеси равняется сумме давлений отдельных компонентов, образующих смесь, т.е. сумме парциальных давлений.

$$P=P_1+P_2+\dots+P_n \quad (1.17)$$

(Парциальным давлением называется давление, которое имеет каждый газ в объеме смеси при температуре смеси). При этом парциальное давление каждого компонента равняется общему давлению, умноженного на величину объемного (молярного) содержания данного компонента в смеси.

$$P_i=r_iP \quad (1.18)$$

Аналогично закону Дальтона, Амага предложил закон аддитивности парциальных объемов, согласно которому общий объем газовой смеси равняется сумме парциальных объемов компонентов смеси:

$$V=V_1+V_2+\dots+V_n \quad (1.19)$$

(Под парциальным объемом компонента идеальной газовой смеси понимается объем, который занимал бы данный компонент при отсутствии остальных, находясь в таком же количестве, под тем же давлением и при той же температуре, что и в смеси).

Парциальный объем каждого компонента газовой смеси равно общему объему, умноженного на объемную (молярную) концентрацию его в смеси

$$V_i=r_iV \quad (1.20)$$

Соотношения между количеством отдельных газов, входящих в смесь, могут задаваться объемным или весовым составом. Объемный состав газовых смесей является одновременно и молярным составом, т.к. объем 1 кмоль углеводородного газа есть величина постоянная, равная $\approx 22,4 \text{ м}^3$.

Закон Гейама (Гремма)

Скорость диффузии газа обратно пропорциональна корню квадратному из его плотности:

Распространяя этот закон на истечение газа из малых отверстий, закон Гейама гласит, что при одинаковых давлениях и температурах скорости

истечения разных газов из малых отверстий обратно пропорционально корням квадратным из их плотностей ρ , т.е.

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{\sqrt{\rho_2}}{\sqrt{\rho_1}} \quad (1.21)$$

Время истечения газов τ через отверстия обратно пропорционально скоростям истечения этих газов w

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{\sqrt{\rho_1}}{\sqrt{\rho_2}} \quad (1.22)$$

Скорость истечения определяется по формуле

$$W = \frac{\sqrt{2(P_1 - P_2)}}{\rho} \quad (1.23)$$

где P_1 и P_2 - начальное и конечное давление
 ρ - плотность газа.

1.2.7.Закон Рауля

Все сжиженные углеводородные газы взаимно растворимы друг в друге, поэтому к ним при невысоких давлениях с достаточной для практики точностью применим закон Рауля.

Парциальное давление P_i любого компонента в жидкой смеси равно молекулярной концентрации его в жидкой фазе X_i , умноженной на упругость его паров P_i' в чистом виде при данной температуре, т.е.

$$P_i = X_i * P_i' \quad (1.24)$$

Общее давление или упругость паров жидкости P , состоящей из нескольких компонентов, равна сумме парциальных давлений этих компонентов:

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n = \sum X_i P_i' \quad (1.25)$$

1.2.8. Средний моль вес смеси

$$M_{см} = \frac{100}{\frac{q_1}{M_1} + \frac{q_2}{M_2} + \dots + \frac{q_n}{M_n}} \quad (1.26)$$

где q_1, q_2 - содержание компонентов в смеси.

1.2.9.Объем паров при испарении жидкости

$$V = \frac{G}{M} * 22.4 \quad (1.27)$$

где G - вес смеси (равно число моль),кг

M - моль, вес, кг/моль

22.4 м³ - объем 1г-моль

$$V_{\text{см}} = \left(\frac{G_1}{M_1} + \frac{G_2}{M_2} + \dots + \frac{G_n}{M_n} \right) * 22.4 \quad (1.28)$$

1.3 Проектирование установок сжиженного газа

При проектировании установок сжиженного газа возможность применения того или иного газа определяется давлением газа в емкостях, рабочей температурой наружного воздуха и составом газа.

Давление газа в емкости со сжиженным газом должно быть таким, чтобы не происходило вскипания жидкости. От величины давления зависит вес емкостей, а, следовательно, и экономичность использования газа. В соответствии с этим упругость насыщенных газов в емкости должна быть не выше 1.6 МПа.

Для осуществления регазификации (испарения) сжиженного газа в емкостях, чтобы получить давление, необходимое для работы установки, желательно использовать тепло окружающего воздуха, т.к. иначе возникает необходимость искусственного подогрева жидкости для его испарения. Температуру в емкости можно принимать на 5-6⁰С ниже температуры внешней среды. Минимально необходимое давление в емкости для работы установки с учетом потерь давления в горелке и регуляторе давления можно принимать 0.1 МПа.

Для получения необходимого давления газа определяют также состав сжиженного газа при данной температуре наружного воздуха. Для смеси пропана с бутаном пользуются графиком, для смеси других газов и для смеси 3-х и более газов - законом Дальтона.

1.4 Задачи и примеры

1.4.1

Определить парциальные давления компонентов, входящих в состав воздуха, находящегося при нормальном давлении.

Решение:

Объемный состав воздуха: O₂ - 21%, N₂ - 79%

т.к. парциальные давления компонентов пропорциональны их объемным (молярным) концентрациям по закону Дальтона:

$$P_i = r_i P, \quad \text{то } P_{O_2} = 760 * 0.21 = 160 \text{ мм.рт.ст.}$$

$$P_{N_2} = 760 * 0.79 = 600 \text{ мм.рт.ст.}$$

1.4.2.

Определить парциальные давления компонентов, входящих в газовую смесь следующего объемного состава:

CH₄ - 90%, C₂H₆ - 5%, C₃H₈ - 5%

Смесь находится под давлением 10 атм.=1 МПа

Решение:

$$P_{CH_4} = 0.9 * 10 = 0.9 \text{ МПа}$$

$$P_{C_2H_6} = 0.05 * 10 = 0.05 \text{ МПа}$$

$$P_{C_3H_8} = 0.05 * 10 = 0.05 \text{ МПа}$$

1.4.3.

Определить теплоту сгорания газообразного топлива, имеющего следующий состав (в % по объему):

CH_4 - 96%, C_2H_6 - 0.8%, C_3H_8 - 0.3%, C_4H_{10} - 0.8%, CO_2 - 0.5%, N_2 - 1%

Решение:

$$Q_p^H = 0.01 * (96.6 * 35840 + 0.8 * 63730 + 0.3 * 93370 + 0.8 * 123770) = 363990 \text{ (КДж/м}^3\text{)}.$$

1.4.4.

Баллон со сжиженным газом, имеющим $P = 0.1 \text{ МПа}$ и $t = 20^\circ\text{C}$, нагрели до $t = 50^\circ\text{C}$. Определить давление в баллоне после нагревания.

Решение:

Применим закон Шарля:

$$P_2 = P_1 * \frac{T_2}{T_1} \quad P_2 = 0.1 * \frac{50 + 273}{20 + 273} = 0.11 \text{ МПа}$$

1.4.5.

Продукты сгорания газа охлаждаются от 926°C до 327°C . Определить во сколько раз уменьшится их объем.

Решение:

Согласно закону Гей-Люссака:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{926 + 273}{327 + 273} = 2$$

1.4.6.

По газопроводу в течение часа подается 1000 м^3 природного газа при абсолютном давлении 0.2 МПа и $t = 20^\circ\text{C}$. Выразить этот объем газа при н.у..

Решение:

Используем объединенный закон Бойля - Мариотта.

$$V_2 = 1000 * \frac{0.2}{0.103} * \frac{273}{293} = 1920 \text{ м}^3$$

1.4.7.

Определить плотность газа рабочего состава примера 1.4.3. Плотность газа определяется, как сумма произведений значений плотности компонентов на их объемные доли

$$\rho^c = 0.01 * (96.6 * 0.717 + 0.8 * 1.357 + 0.3 * 2.019 + 0.8 * 2.703 + 0.5 * 1.977 + 1 * 1.251) = 0.156 \text{ кг/м}^3$$

Относительная плотность газа (по воздуху)

$$S^c = \frac{0.756}{1.293} = 0,585$$

Основной характеристикой газа является сухой состав, но т.к. используемый газ бывает влажным, может возникнуть необходимость пересчета Q_p^H , ρ^c , S^c на рабочий состав (с учетом влажности газа).

$$\rho^p = (\rho^c + d)K \text{ кг/м}^3$$

$$Q_p^H = Q_H^c K$$

где $K = \frac{0.804}{0.804 + d}$, d - влагосодержание газа (кг/м сухого газа при н.у.)

1.4.8.

Определить рабочий состав газа Q_p^H и ρ^p считая, что $d = 0.005 \text{ кг/м}^3$

$$K = \frac{0.804}{0.804 + 0.005} = 0.994$$

Рабочий состав газа будет:

$CH_4 = 95.993$, $C_2H_6 = 0.795$, $C_3H_8 = 0.298$, $C_4H_{10} = 0.795$, $CO_2 = 0.497$, $N_2 = 0.994$, $H_2O = 0.628$

Плотность влажного газа $\rho = (0.756 + 0.005) * 0.994 = 0.757 \text{ кг/м}^3$

Теплота сгорания рабочего состава $Q_p^H = 36390 * 0.994 = 36170 \text{ кг/м}^3$

1.4.9.

Определить плотность CH_4 при $t = 20^\circ C$ и $P = 760 \text{ мм.рт.ст.}$ (при $t = 20^\circ$ и $P = 1 \text{ МПа}$), если $\rho \text{ н.у.} = 0.7168 \text{ кг/м}^3$

Решение:

$$\rho_{20,760} = 0.7168 * \frac{760}{760} * \frac{273}{293} = 0.67 \text{ кг/м}^3 \text{ (стандартные условия)}$$

$$\rho_{20,1} = 0.7168 * \frac{1}{0.1} * \frac{273}{293} = 6.67 \text{ кг/м}^3$$

1.4.10.

Определить общее давление смеси сжиженных газов при $t = +20^\circ C$ если моль состав жидкости следующий: C_3H_8 - 80%, C_4H_{10} - 20%

Решение:

$$P = 0.8 * 0.85 + 0.2 * 0.205 = 0.72 \text{ МПа}$$

1.4.11.

Определить объем паров при н.у., получающихся при испарении 1000 кг смеси следующего весового состава:

C_4H_{10} - 50%, $M = 58.12$; C_3H_8 - 50%, $M = 44.09$

Решение:

Средний молекулярный вес смеси для состава газа, выраженного в весовых процентах:

$$M_{\text{см}} = \frac{100}{\frac{r_1}{M_1} + \frac{r_2}{M_2} + \dots}$$

q_1, q_2, q_n - весовое, процентное или доленое содержание компонентов

$$M_{\text{см}} = \frac{100}{\frac{50}{44.09} + \frac{50}{58.12}} = 50.03 \quad V = \frac{1000}{50.03} * 22.4 = 447 \text{ нм}^3$$

1.4.12.

100 м^3 - CH_4 , находящегося при давлении 10 ата, смешаны с 40 м^3 - C_3H_8 , находящегося при давлении 5 ата, и помещены в газгольдер емкостью 200 м^3 . Определить парциальные давления компонентов в газгольдере, общее давление газа в газгольдере и объемный состав смеси.

Решение:

Определение парциальных давлений компонентов сводится к приведению каждого газа к новому общему объему смеси после помещения ее в газгольдер.

$$P_{\text{CH}_4} = \frac{100 * 10}{200} = 5 \text{ ата} \quad P_{\text{C}_3\text{H}_8} = \frac{40 * 5}{200} = 1 \text{ атм.}$$

Общее давление смеси в газгольдере:

$$P = 1 + 5 = 6 \text{ атм.}$$

Объемный состав смеси:

$$\text{CH}_4 - 5:6 = 0.835 = 83.5\%$$

$$\text{C}_3\text{H}_8 - 1:6 = 0.165 = 16.5\%$$

1.4.13.

Вычислить удельный вес смешанного газа, состоящего из 50%- C_3H_8 и 50%- H -бутана по объему при $P=760 \text{ мм.рт.ст.}$ и $t=0^\circ\text{C}$ (при задании объемного состава в долях единицы табл.46)

$$\rho = 0.5 * \text{C}_3\text{H}_8 + 0.5 * \text{C}_4\text{H}_{10} = 2.35 \text{ кг/нм}^3$$

Практическое занятие 2

2.1 УСТАНОВКИ СЖИЖЕННОГО ГАЗА

Установки для использования сжиженного газа могут быть индивидуальные, групповые и резервуарные.

Индивидуальные установки имеют производительность, достаточную для обеспечения работы 4-х конфорочной плиты, или проточного водонагревателя с тепловой нагрузкой при установке баллона в помещении и любом составе жидкого газа и 4-х конфорочной плиты или водонагревателя с тепловой нагрузкой до 10000 ккал/ч при установке баллона на открытом воздухе в средней полосе России и заполнении баллона техническим пропаном. Поэтому расчет производительности индивидуальной баллонной установки не требуется. Без расчета для индивидуальной установки применяется также регулятор давления типа РДГ-6 и газопровод диаметром 15 мм из стальных труб или резиноканевых шлангов.

Групповые установки применяются для газоснабжения отдельных более крупных потребителей (отдельного жилого дома, небольшого предприятия и т.д.) до сооружения резервуарной установки. Суммарная емкость группы баллонов для жилых, общественных зданий и коммунально-бытовых потребителей не должна превышать 600 л при размещении баллонной установки у стен зданий и 1000 л при наличии разрывов от зданий (от 8 до 25 м), а для коммунальных и бытовых предприятий - соответственно 100 и 150 л.

Количество баллонов в групповой установке для жилых зданий определяется по номинальным расходам газа приборами по формуле:

$$N = \frac{qnk_0}{Q_p^H V} \quad (2.1)$$

где N - количество баллонов в установке, шт;

q - номинальная тепловая нагрузка газовых приборов, установленных в одной квартире, кдж/ч (стр.3, Пешехонов Н.И. "Проектирование газоснабжения");

n - количество обслуживаемых квартир;

k₀ - коэффициент одновременности (СНиП 2.04.08—87*);

Q_p^H - низшая теплота сгорания газа, кдж/нм³;

V - расчетная производительность одного баллона, нм³/ч;

Количество баллонов для газоснабжения коммунальных, промышленных и сельскохозяйственных объектов определяется по суммарной номинальной тепловой нагрузке агрегатов с введением коэффициента одновременности, учитывающего возможное уменьшение нагрузки вследствие несовпадения времени работы агрегатов. Производительность одного баллона зависит от температуры наружного воздуха, принятой за расчетную, равномерности работы установки и

длительности ее непрерывной работы. В соответствии с существующей практикой проектирования применяется двойной комплект баллонов - один рабочий и один резервный - и предусматривается возможность их отдельной и совместной работы. Резервный комплект должен быть всегда заполнен смесью, т.к. он рассчитан на работу в зимний период. В этом случае при расчете производительности баллона применяют среднюю температуру января.

Резервуарные установки подают газ значительному количеству потребителей по наружной газовой сети. Суммарный геометрический объем резервуаров резервуарной установки при наземном расположении составляет не более 20 м^3 , а при подземном не более 50 м^3 . Максимальный объем одного резервуара при объеме установки до 20 м^3 - 5 м^3 , при объеме установки 21 - 50 м^3 не более 10 м^3 .

Расчетный расход газа на хозяйственно-бытовые и коммунальные нужды определяется по годовым нормам расхода газа (СНиП)

$$V = \frac{q_{\text{год}} n k_c}{Q_H^p 8760} \quad (2.2)$$

где: $q_{\text{год}}$ - расход газа на 1 человека, кдж/год;

n - количество жителей, пользующихся газом;

k_c - коэффициент суточной неравномерности за год (при наличии газовых плит = 1,4; при наличии газовых плит и водонагревателей $k_c = 2,0$);

Q_H^p - теплота сгорания газа, кдж/нм³.

Для отдельных установок и приборов расход газов определяется по номинальным расходам газа и коэффициентам одновременности.

Количество резервуаров в установке определяется

$$N = \frac{\Sigma V}{v} \quad (2.3)$$

где: v - производительность одного резервуара, определяемая по СНиП

2.2 Задачи и примеры

2.2.1.

Определить число баллонов емкостью 50 л в баллонной установке, предназначенной для газоснабжения восьми квартирного жилого дома. В кухнях всех квартир установлены 4-х конфорочные газовые плиты. Объемный состав газа: C_3H_8 - 75%, C_4H_{10} - 25%.

Решение:

1. Q_H^p сгорания смеси (без учета фракционности испарения)

$$Q_H^p = 0,75 * Q_H^p + 0,25 * Q_H^p$$

2. Номинальная теплопроизводительность плиты определяется по [7]. Производительность одного баллона составляет $v = 0,2 \text{ м}^3/\text{ч}$.

3. $k_0 = 0,27 - [1]$ (принято для 8 квартир, в которых установлены 4-х конфорочные плиты)

4. Число рабочих баллонов в установке:

$$N = \frac{qnk_0}{Q_{Hv}^p} = \frac{8*1000*0,27}{23780*0,2} = 4,6 \approx 5 \text{ шт.}$$

С учетом резервных принимаем 10 шт.

2.2.2

Определить производительность 50 л ($d = 0,3\text{м}$, $h = 0,9\text{ м}$), заполненного сжиженным газом на 75%, при $t_H = -5^0\text{C}$ температуру жидкой фазы в баллоне максимально допустим (-30^0C). Скрытая теплота парообразования $r = 90\text{ ккал/кг}$.

РЕШЕНИЕ:

$$k = 50.2 \text{ кДж/м}^2 \text{ ч } ^0\text{C}$$

1. Смоченная поверхность баллона:

$$F_{\text{см}} = 0,75nd(0,5d + h) = 0,75*3,14*0,3(0,15+0,9) = 0,743 \text{ м}^3$$

(при неизменной температуре жидкости)

$$G_{\text{исп}} = \frac{kF_{\text{см}}(t_H - t_C)}{r} = \frac{50.2*0,743((-5 - (-30))}{412} = 2,26 \text{ кг/ч}$$

без учета теплосодержания жидкой фазы и самого баллона.

2.2.3

Определить количество испаряющегося в час сжиженного пропана в наземном резервуаре ($d = 1,0\text{м}$ и $l = 3,3\text{м}$) при $t_H = -6^0\text{C}$, температура жидкой фазы $t_{\text{ж}} = -29^0\text{C}$. Резервуар наполнен жидкой фазой на 50% $F_{\text{см}} = 5,4 \text{ м}^2$.

РЕШЕНИЕ:

$$G_{\text{исп}} = \frac{50.4*5,41*((-6 - (-29))}{399} = 17 \text{ кг/ч}$$

2.2.4

Определить число подземных резервуаров объемом 5 м^3 в групповой установке, предназначенной для газоснабжения 4-х жилых домов с числом жителей 500 человек и домовой кухней с суммарной тепловой нагрузкой установленных газовых приборов ($q=580 \text{ МДж/ч}$). В кухнях квартир установлены 4-х конфорочные плиты и проточные водонагреватели.

Объемный состав газа: $\text{C}_3\text{H}_8 - 75\%$; $\text{C}_4\text{H}_{10} - 25\%$; $Q_H^p=98 \text{ МДж/м}^3$

РЕШЕНИЕ: Расход газа на 1 человека по [1] $q=2800 \text{ МДж/год}$

1. Расход газа на домовую кухню

$$V_k = \frac{580000}{98000} = 5.9 \text{ м}^3/\text{ч}$$

2. Расход газа на квартиры:

$$V_{\text{кв}} = \frac{n * K_H * q_{\text{год}}}{Q_H^p * 365 * 24} = \frac{500 * 2 * 8000}{98 * 365 * 24} = 9.43 \text{ м}^3/\text{ч}$$

3. Расход газа на резервуары

$$V_p = V_K + V_{KB} = 5.9 + 9.43 = 15.33 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Принимаем давление в резервуаре 0,05 МПа, остаточное содержание $C_3H_8=60\%$, температура грунта на уровне оси резервуара $0^\circ C$, коэффициент теплопроводности грунта $2,56 \text{ Вт}/(\text{м К})$. Остаточный уровень сжиженного газа в емкости 35% . По номограмме [1] находим производительность одного резервуара, равную $3,0 \text{ м}^3/\text{ч}$

Число резервуаров в установке: $N=15.33/3=5$ шт.

2.2.5

Определить количество подземных резервуаров емкостью 2.5 м^3 в групповой установке, предназначенной для газоснабжения жилого дома со 100 квартирами, оборудованными 4-х конфорочными плитами. Газ C_3H_8

$$Q_H^p = 91.14 \text{ МДж}/\text{нм}^3.$$

v – производительность одного резервуара, $5,5 \text{ нм}^3/\text{ч}$

$$N = \frac{n * q * K_0}{Q_H^p * v} = \frac{100 * 41.9 * 0.26}{91.14 * 5.5} = 2.2 \text{ шт}$$

2.3 Точка росы.

Конденсация насыщенного пара определяется по температуре точки росы. Незначительное сжатие насыщенного пара при $t = \text{const}$ или охлаждения при $P = \text{const}$ приводят к перенасыщению - выпадает роса.

Температура точки росы определяет минимальную температуру, при которой целесообразно производить распределение смеси пропан - бутановых газов по трубопроводам.

Определение точки росы паров смесей углеводородов, находящихся под атмосферным давлением, производят графическим методом по номограмме. Номограмма В.Черли., в которой можно определить зависимость точки росы от состава смеси C_3H_8 , $n-C_4H_{10}$ и $\text{изо}-C_4H_{10}$ приводится в учебнике “Газификация городов сжиженными газами” (стр.340 И.Д. Букшун.)

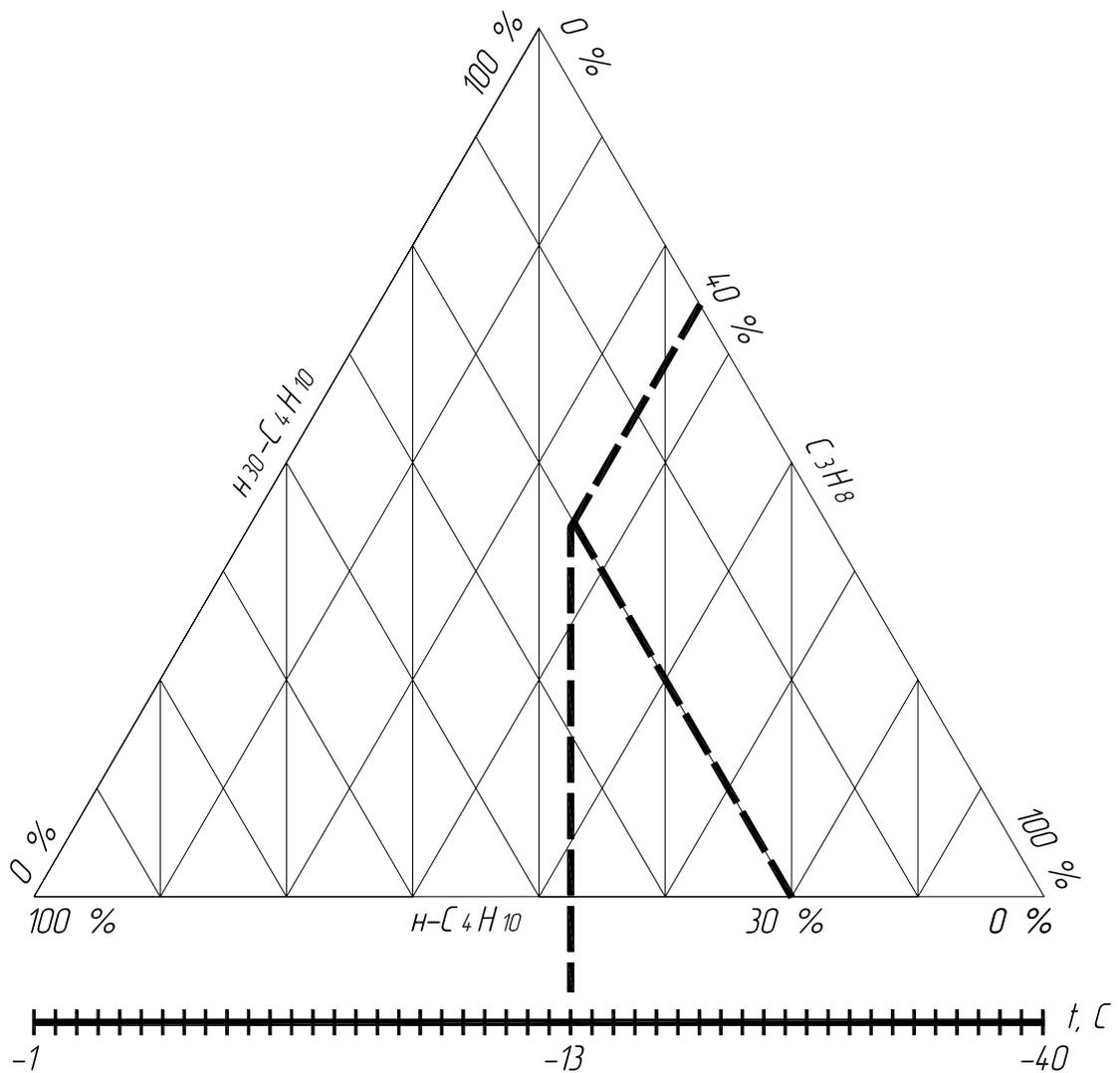


Рис 3.1 - Номограмма В. Черли, определение точки росы

Для определения точки росы смеси необходимо найти пересечение линий процентного содержания двух компонентов с вертикальной линией точки росы, значения которой отложены на линии, параллельной содержанию н-бутана.

ПРИМЕР. Найти точку росы для смеси, содержащей пропан - 40%, н-бутан - 30% и изобутан - 20%.

Решение: Достаточно найти пересечение линии, соответствующей 40% C_3H_8 с линией, соответствующей 30% $n-C_4H_{10}$.

Опустив из точки пересечения вертикальную прямую на шкалу температур,

находим точку росы смеси $t_{m.p.} = -13^{\circ}C$.

Практическое занятие 3

Тема: Диаграмма состояния

Одним из положительных свойств углеводородных газов - его способность сжижения при сравнительно небольшом повышении давления. Поэтому при использовании сжиженных газов имеет место переход из одного фазового состояния в другое. При расчете процессов и оборудования испаряющих сжиженных газов необходимо исходить из свойств жидкой и паровой фаз с учетом особенностей фазовых превращений.

С допустимой для практики точностью эти расчеты выполняются по диаграммам состояния углеводородов.

По ним можно определить: упругость паров при данной температуре, давление перегретых паров (газовой фазы) при данных условиях, удельный объем и плотность жидкой, паровой и газовой фаз, их теплосодержание (энтальпию), теплоту парообразования, степень сухости и влажности паров, работу сжатия газа компрессором и повышение температуры при сжатии, эффект охлаждения жидкости и газа при снижении давления (дросселировании), теплоемкость при $P = \text{const}$ или $V = \text{const}$ для жидкой, паровой и газовой фаз, скорость истечения газа из сопел газогорелочных устройств.

Диаграммы построены для C_3H_8 , изо- C_4H_{10} и н- C_4H_{10} . Диаграмму состояния строят на полулогарифмической сетке из горизонтальных линий постоянного абсолютного давления (изобары) и вертикальных линий постоянного теплосодержания (энтальпии, i , ккал/кг). На сетку диаграммы нанесены следующие точки и линии.

1. Точка «К» - критические состояния данного углеводорода по критическому давлению и критической температуре. Температура, выше которой данный газ не может быть сжижен ни каким повышением давления, называется критической температурой данного газа. Давление, необходимое для сжижения при этой критической температуре, называется критическим давлением.

2. Пограничная кривая ПКЖ, проходящая через точки критического состояния и делящая диаграмму на три зоны: I зона - жидкая фаза; II зона - парожидкостная смесь; III зона - газовая смесь. Ветвь ЖК характеризует состояние насыщенной жидкости при различных давлениях «КП»

3. Кривые сухости пара КХ, которые выходят из критической точки «К» и характеризуют долю пара в двухфазной системе, кг/кг ($X = 0,1 \dots$).

4. Линии $t = \text{const}$ (изотермы) изображены ломаной кривой с горизонтальным участком ЕМ ($t = \text{const}$ и P при кипении жидкой фазы). Изотермы температур выше критических для данного углеводорода ТЕ. Эти линии не пересекают линию насыщенного пара и при этих температурах газ не удается перевести в сжиженное состояние.

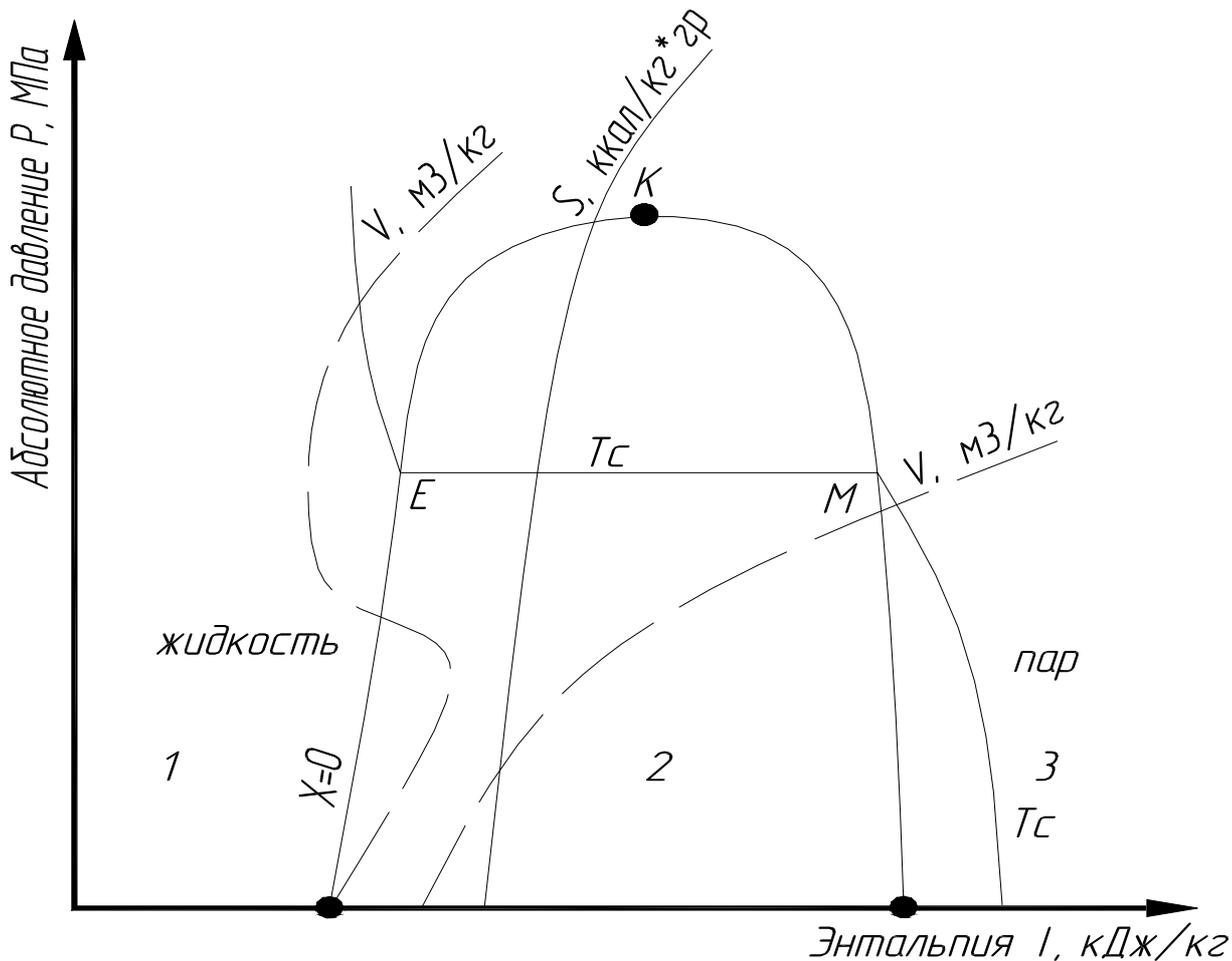


Рис 1.1 - Диаграмма состояния углеводородов

5. Линии постоянных удельных объемов (V) - изохоры, м³/кг. Эти же линии соответствуют постоянной плотности. $\rho = \text{const}$.
6. Линии постоянной энтропии S (адиабаты) используются для определения параметров углеводорода при сжатии его в декомпрессоре и при истечении из сопел горелок.

3.2 Задачи и примеры

3.2.1

Определить упругость насыщенных паров жидкого пропана, находящегося в резервуаре, если $t_{\text{ж}} = -10^{\circ}\text{C}$.

Решение;

Пересечение линии постоянной температуры равно $t = -10^{\circ}\text{C}$ с пограничной кривой насыщенного пара. На оси ординат: $P = 3,5$ ата

3.2.2.

Определить удельный объем и плотность жидкой и паровой фазы пропана при условии примера № 1.

Решение:

Удельный объем жидкого пропана находится в точке пересечения линии $t = \text{const} = -20^{\circ}\text{C}$ с пограничной линией насыщенной жидкости, а удельный объем насыщенных паров в точке пересечения с линией насыщенного пара.

$$V_{\text{ж}} = 0,0018 \text{ м}^3/\text{кг}; \rho_{\text{ж}} = \frac{1}{0,0018} = 554 \text{ кг/м}^3;$$

$$V_{\text{п}} = 0,13 \text{ м}^3/\text{кг}; \rho_{\text{п}} = \frac{1}{0,13} = 7,7 \text{ кг/м}^3$$

3.2.3.

Определить скрытую теплоту испарения жидкости пропана при условии примера № 1.

Решение: $\gamma = i_{\text{н.п.}} - i_{\text{ж}}$

пересечение линии постоянной температуры с пограничными кривыми

$$i_{\text{ж}} = 15 \text{ ккал/кг}; r = 110 - 15 = 95 \text{ ккал/кг};$$

$$i_{\text{н.п.}} = 110 \text{ ккал/кг}.$$

3.2.4.

После заполнения баллона пропаном объем жидкости фазы составил 90% объема баллона. Температура $t = 15^{\circ}\text{C}$. С повышением температуры объем паровой подушки будет уменьшаться. Определить, при какой температуре баллон будет полностью заполнен жидкостью?

Решение: При $t = 15^{\circ}\text{C}$;

$$\rho_{\text{ж}} = \frac{1}{0,00197} = 0,507 \text{ кг/л}$$

Тогда количество жидкого C_3H_8 в баллоне будет:

$$M_{\text{ж}} = 0,507 \times 0,9V = 0,456 \times V$$

(V - объем баллона в л)

$$\rho_{\text{п}} = \frac{1}{0,075} = 13,6 \text{ кг/м}^3$$

Количество парообразного пропана в баллоне

$$M_{\text{п}} = 13,6 \times 0,1 \times \frac{V}{1000} \text{ кг}$$

Делим на 1000 для перевода из л в м^3 .

Общее количество C_3H_8 в баллоне:

$$M = (0,514 \times 0,9 + \frac{1,36}{1000}) \times V = (0,465 + 0,0014)V = 0,466V \text{ кг}$$

Доля массы паровой фазы составляет $\approx 3\%$.

Определим плотность жидкости, когда она полностью заполнит баллон:

$$\rho_{\text{жс}} = \frac{M}{V} = \frac{0,466 \cdot V}{V} = 0,466 \text{ кг/л}$$

$$V = \frac{1}{0,466} = \frac{2,15}{1000} = 0,00215 \text{ м}^3/\text{кг}$$

По диаграмме находим: $t \approx 40^\circ\text{C}$.

Следовательно, при $t \approx 40^\circ\text{C}$ паровая подушка исчезнет, и при дальнейшем повышении температуры жидкость будет расширяться, расти давление в баллоне и напряжение его стенок, что может привести к разрыву баллона.

3.2.5.

В баллоне емкостью $V = 50$ л под давлением насоса заливают 20 кг C_3H_8 . После установления термодинамического и теплового равновесия температура баллона и $\text{C}_3\text{H}_8 = 15^\circ\text{C}$. Определить P , которое установилось в баллоне, количество и объем жидкости и паровой фаз.

Решение:

1. Предположим, что в баллоне образовалась паровая подушка, тогда давление P в нем будет равно давлению насыщения для C_3H_8 при температуре $t = 15^\circ\text{C}$. Если в баллоне однородная система (жидкость), то давление может быть $> P_{\text{НАС}}$

По диаграмме: $P_{\text{БАР}} = P_{\text{НАС}} = 7,8 \text{ ата(абс.)}$

2. Определяем плотность жидкой и паровой фаз при давлении насыщения (по нижней и верхней пограничным кривым):

$$\rho_{\text{ж}} = \frac{1}{0,00197} = \frac{500}{1000} = 0,507 \text{ кг/л};$$

$$\rho_{\text{п}} = \frac{1}{0,07} = 15,51 \text{ кг/м}^3$$

3. Определим объем паровой подушки $V_{\text{п}}$ и жидкости $V_{\text{ж}}$, учитывая, что их суммарная масса равна 20 кг, а $V_{\text{п}} + V_{\text{ж}} = 50$ л.

$$\frac{V_{\text{п}}}{1000} \times 15,51 + (50 - V_{\text{п}}) \times 0,507 = 20$$

$$V_{\text{п}} = 10,9 \text{ л}; V_{\text{ж}} = 50 - 10,9 = 39,1 \text{ л}$$

4. Определим массы пара и жидкости:

$$M_{\text{п}} = \frac{10,9}{1000} \times 15,51 = 0,17 \text{ кг};$$

$$M_{\text{ж}} = 39,1 \times 0,507 = 19,83 \text{ кг}$$

3.2.6.

Температура пропана в баллоне $t = 30^\circ\text{C}$. Пары его проходят через регулятор, где их давление снижается до 0,128 МПа (1,28 ата). Определить температуру C_3H_8 после регулятора и величину перегрева паров.

Решение:

1. Из баллона выходит насыщенный пар, поэтому его состояние в диаграмме будет соответствовать точке пересечения изотермы $t = 30^{\circ}\text{C}$ и пограничной кривой пара: $P = 10,1$ ата.

2. Процесс дросселирования на клапане протекает при постоянной энтальпии, т.е. при $i = \text{const}$. Поэтому для определения конечного состояния через точку 1 проводим линию до пересечения с линией $P_n = 1,28$ ата. Через эту точку проходит изотерма $= 9^{\circ}\text{C}$. Температура C_3H_8 при этом снижается на $= 30 - 9 = 21^{\circ}\text{C}$.

Несмотря на снижение температуры C_3H_8 пар перегревается т.к. давление $P_n = 1,28$ ата, соответствует $t_n = -38^{\circ}\text{C}$. Следовательно, перегрев пара составит $\Delta t_{\text{пер}} = 9 - (-38) = 47^{\circ}\text{C}$.

3.2.7.

Определить количество пара, которое образуется при дросселировании жидкости C_3H_8 от 8 до 2 ата и температуру в начале и в конце дросселирования.

Решение:

Дросселирование жидкости происходит по линии $i = \text{const}$ от 8 до 2 ата. Точка 2 пересекается с линией истинной сухости. X' показывает количество пара, образовавшегося в результате дросселирования жидкости.

Это количество равно $0,25$ кг/кг $t = -25^{\circ}\text{C}$.

Практическое занятие 4

4.1 ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ

4.1.1.

Определить работу, необходимую для сжатия 1 кг насыщенных паров C_3H_8 от 0,2 до 0,8 МПа. и t_K пара (в конце процесса). Процесс сжатия протекает по линии постоянной энтропии.

РЕШЕНИЕ:

Практическая работа сжатия определяется разностью энтальпий в конце и в начале процесса.

$$\Delta i_{CЖ} = i_K - i_H = 520 - 460 = 60 \text{ кДж/кг}$$

Температура пара в конце процесса равна $+25^\circ C$.

4.1.2.

Определить упругость паров $P_{НАС}$ C_3H_8 и плотность его жидкой и паровой фаз. C_3H_8 находится в баллоне при $t = -25^\circ C, 0^\circ C, +16^\circ C, +25^\circ C$.

РЕШЕНИЕ.

$$1. \text{ при } t = -25^\circ C; P_{НАС} = 0,2 \text{ МПа}; \rho_{ж} = \frac{1}{V_c} = \frac{1}{1678} = 0,562 \text{ кг/л};$$

$$\rho_{п} = \frac{1}{V_{п}} = \frac{1}{0,22} = 4,45 \text{ кг/м}^3$$

$$\text{при } t = 16^\circ C; P_{НАС} = 0,2 \text{ МПа } \rho_{ж} = 0,501 \text{ кг/л}; \rho_{п} = 15,4 \text{ кг/м}^3$$

Из расчетов видно, что с повышением температуры упругость паров C_3H_8 существенно увеличивается, плотность пара также растет, а плотность жидкой фазы уменьшается.

4.2. МЕТОДЫ НАПОЛНЕНИЯ ХРАНИЛИЩ.

Требуемая разность уровней для надежного обеспечения слива сжиженного газа определяется:

$$H_p = \frac{10^2 (P_p - P_{ц})}{\rho_{ж.ср}} \text{ м}; H_{p,сл} = \Delta H_p + (13 \div 20), \text{ м}$$

где P_p - давление в стационарном резервуаре;

$P_{ц}$ - давление в цистерне, кгс/см^2 ;

$\rho_{ж.ср}$ - плотность жидкой фазы, кгс/л .

4.2.1.

В зимних условиях при $t = -25^\circ C$ необходимо слить сжиженный газ (C_3H_8) с плотностью жидкой фазы, $0,52 \text{ кгс/л}$ в подземную емкость с температурой грунта, равной $-5^\circ C$. Определить необходимую разницу уровней.

РЕШЕНИЕ:

Давление P_p для $t = -5^{\circ}\text{C}$ (по диаграмме) равно 0,399 МПа, $P_{ц}$ для $t = -25^{\circ}\text{C}$ равно 0,197 МПа.

$$\Delta H_p = \frac{10^2(0.399 - 0.197)}{0,51} = 39.6$$

т.е. цистерна может располагаться ниже резервуара на

$$H = 39,6 + (13 \div 20) = 52,6 \div 59,6 \text{ м}$$

4.2.2

В летних условиях при $t=25^{\circ}\text{C}$ необходимо слить сжиженный пропан C_3H_8 с $\rho_{\text{ср}}=0,51$ кг/л в подземную емкость с $t=10^{\circ}\text{C}$.

Определить необходимую разность уровней.

РЕШЕНИЕ:

Давление D_y для $t=25^{\circ}\text{C}$ по диаграмме равно 0,951 МПа, для P_p при $t=10^{\circ}\text{C}$ составляет 0,629 МПа.

$$\Delta H_p = \frac{10^2(0.629 - 0.951)}{0,51} = -62 \text{ м}$$

т.е. цистерна может располагаться ниже резервуара на

$$H = -62 + (13 \div 20) = -49 \div -42 \text{ м}$$

4.2.3.

Определить мощность холодильной установки для обеспечения работы изотермического резервуара емкостью $G_{\text{р.сж}} = 1000$ т при поступлении по железной дороге 6 цистерн с C_3H_8 в сутки. Скорость слива 35 т/ч, $t_{\text{н}} = 20^{\circ}\text{C}$.

Решение: Мощность холодильной установки на сжижение газа, испаряющегося в резервуаре в период его хранения, составляет 0,3 - 0,5%.

$$Q_{\text{н}} = \frac{0,005 * G_{\text{р.сж}} * \Gamma}{24} = \frac{0,005 * 10^6 * 90}{24} = 18750 \text{ ккал/ч}$$

где: Γ - теплота испарения пропана, равная 90 ккал/кг;

0,005(0,3-0,5%) - часть испаряющегося газа в резервуаре при его хранении.

Основное поступление тепла в хранилище происходит с жидкой фазой, подаваемой для наполнения резервуара:

$$Q_y = V_y \cdot (t_y - t_p)$$

где: V_y - скорость наполнения резервуара, кг/ч

t_y - температура жидкой фазы, подаваемой в резервуар, $^{\circ}\text{C}$

t_p - температура жидкой фазы в резервуаре (-42°C).

2. Поступление тепла с жидкой фазой из железнодорожной цистерны:

$$c = 0,53 \text{ ккал/кг } ^{\circ}\text{C}$$

$$Q_y = 35000 \times 0,53 \cdot ((20 - 9 - 42)) = 1150000 \text{ ккал/ч}$$

Мощность холодильной установки:

$$Q_y = Q_y + Q_{\text{ц}} = 1150000 + 18750 = 1168750 \text{ ккал/ч}$$

Практическое занятие 5

Тема: Горение газов

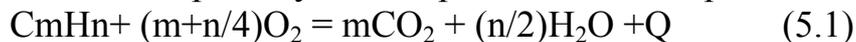
5.1 Расчеты горения

Горение представляет собой быструю химическую реакцию соединения горючих с кислородом, сопровождающуюся интенсивным выделением тепла с резким одновременным повышением температуры. Реакции горения выражаются стехиометрическими уравнениями с качественным и количественным определением веществ, вступающих в реакцию и образующихся в результате ее.

Так, например, для метана реакция горения выглядит следующим образом:



Реакцию горения углеводородных газов выразить общим уравнением:



где m - число углеродных атомов в молекуле углеводорода.

n - число водородных атомов в той же молекуле.

Q - тепловой эффект реакции.

В практических условиях сжигания газа кислород для горения подается с воздухом как его составная часть. Состав сухого воздуха без учета незначительных количеств углекислоты и резких газов, принимается следующим (в % по объему)

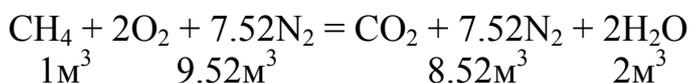
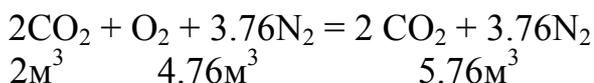
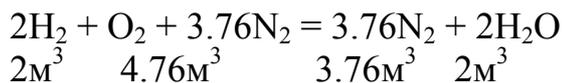
по объему	по весу
$\text{O}_2 - 21.0$	23.2
$\text{N}_2 - 79.0$	76.8

Следовательно, 1 м^3 - O содержится в $\frac{100}{21} = 4.76 \text{ м}^3$ воздуха, или на 1 м^3

кислорода приходится $\frac{79}{21} = 3.76 \text{ м}^3 \text{ N}_2$

Расчет обычно ведут на 100 м^3 сухого газа, и все объемы относят к нормальным условиям.

Учитывая, что кмоль любого газа при нормальных условиях занимает примерно одинаковый объем, реакции горения газов могут быть выражены:



Наименьшее количество воздуха, соответствующее приведенным стехиометрическим соотношениям, называется теоретическим расходом воздуха который может быть подсчитан, $\text{нм}^3/\text{нм}^3$:

$$L_T = 1/21(0.5\text{H}_2 + 0.5\text{CO} + 2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_4 + 3.5\text{C}_2\text{H}_6 + 4.5\text{C}_3\text{H}_6 + 5\text{C}_3\text{H}_8 + 6\text{C}_4\text{H}_8 + 6.5\text{C}_4\text{H}_{10} - 0_2) \quad (5.2)$$

Практический расход воздуха $L_{\text{П}}$, вследствие несовершенства перемешивания газа и воздуха, берется несколько больше теоретического

$$L_{\text{П}} = \alpha * L_T \quad (5.3)$$

где α - коэффициент избытка воздуха, который принимается в пределах 1.05 - 1.2

Определение количества продуктов сгорания производится аналогично определению расхода воздуха. Объем продуктов сгорания газов может быть подсчитан по составу газа

1. Объем сухих трехатомных газов, $\text{нм}^3/\text{нм}^3$

$$V_{\text{RO}_2} = 0.01(\text{CO} + \text{CO}_2 + \sum n\text{C}_n\text{H}_m) \quad (5.4)$$

2. Объем водяных паров, $\text{нм}^3/\text{нм}^3$ газа

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0.01[\text{H}_2 + 0.5\sum m\text{C}_n\text{H}_m + 0.124(d_{\text{T}} + \alpha V_0 d_{\text{B}})] \quad (5.5)$$

3. Объем двухатомных газов, $\text{нм}^3/\text{нм}^3$

$$V_{\text{O}_2 + \text{N}_2} = V_0(\alpha - 0.21) + 0.01\text{N}_2 \quad (5.6)$$

где CO, CO₂, C_nH_m - составляющие горючего газа в % по объему

d_{T} - влажность газа, $\text{г}/\text{нм}^3$

d_{B} - влагосодержание воздуха, $\text{г}/\text{нм}^3$

Полный объем продуктов сгорания 1нм^3 газового топлива определяется

$$\Sigma V = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{O}_2 + \text{N}_2} \quad (5.7)$$

5.2 Примеры и задачи

5.2.1.

Определить теоретически необходимое количество воздуха V_{T} нм^3 для полного сгорания 1нм^3 природного газа состава: CH₄ - 97.9%, C₂H₆ - 0.5%, C₃H₈ - 0.2% C₄H₁₀ - 0.1%, CO₂ - 0.1%, N₂ - 1.2%

Решение:

Величина V_{T} нм^3 воздуха/ нм^3 сухого газа, вычисляемая по общему выражению (5.2) для любого горючего газа по выражению

$V_{\text{T}} = \frac{1}{21} * (2*97.9 + 3.5*0.5 + 5*0.2 + 6.5*0.1) = 9.5 (\text{нм}^3 \text{ воздуха}/\text{нм}^3 \text{ сухого газа}).$

V_{T} может быть подсчитан для природного газа по выражению

$$V_{\text{T}} = 7.13 \bar{n} + 2.28 = 7.13 * 1.01 + 2.28 = 9.5 (\text{нм}^3/\text{нм}^3)$$

где: \bar{n} - углеродное число

$$\bar{n} = \frac{1CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + \dots}{100 - B} = \frac{1*97.9 + 2.05 + 3.02 + 4*0.1}{100 - 1.3} = 1.01$$

где: B=CO₂+N₂

5.2.2. Определить состав продуктов горения при полном сжигании 1нм³ природного газа состава, приведенного в примере 5.2.1. Коэффициент избытка воздуха α=1.1. На горение потребляется воздух (t=15 °С, φ= 50%, d_В =6.4г/нм³); содержание влаги в природном газе d_Г=1.5г/нм³

Решение.

Из уравнения примера 5.2.1 $\bar{n} = 0.01$; V_Г= 9.5нм³/нм³

На основе уравнений (5.4 - 5.6) для любого горючего газа имеем:

$$V_{CO_2} = 0.01 * (0.1 + 97.9 + 2.01 + 3 * 0.2 + 4 * 0.1) = 1 (\text{нм}^3 / \text{нм}^3 \text{ газа})$$

$$V_{H_2O} = 0.01 * ((0.5(4 * 97.9 + 6.05 + 8.02 + 10.01) + 0.124(1.5 + 1.1 * 9.5 * 6.4))) = 2.06 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

$$V_{O_2+N_2} = 9.5 * (1.1 - 0.21) + 0.01 * 1.2 = 8.46 (\text{нм}^3 / \text{нм}^3)$$

$$\Sigma V = 1 + 2.06 + 8.46 = 11.52 (\text{нм}^3 / \text{нм}^3 \text{ газа})$$

5.2.3.

Определить теоретически необходимое для сжигания количество кислорода и воздуха, объем продуктов сгорания и суммарный объем сухих и влажных продуктов сгорания. Расчет расхода воздуха и продуктов полного сгорания проводят при α, взятом из табл.5.2.1. по № студента в журнале преподавателя.

Таблица 5.2.1.

№	Газ	Состав газа по объему, %										к. изб
		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	СН	CO ₂	H ₂	CO	O ₂	2	
0	Оренбургский	85,6	4,9	1,6	0,75	0,55	0,6	-	-	-	6	1
1	Уренгойский	98,3	0,3	0,2	0,1	-	0,1	-	-	-	1	1,05
2	Бугурусланский	76,7	5,4	1,7	0,8	0,6	0,2	-	-	-	14,6	1,1
3	Ставропольский	98	0,2	0,1	-	-	0,5	-	-	-	1,2	1,15
4	Шебелинский	93,7	4,2	0,8	0,3	0,4	0,1	-	-	-	0,5	1,2
5	Мелитопольский	97,9	-	-	0,1	-	0,2	-	-	-	1,8	1,25
6	Газлинский	93	3,1	0,7	0,6	-	0,1	-	-	-	2,5	1,3
7	Краснодарский	69,2	10	10	5	5	0,7	-	-	-	0,1	1
8	Ухтинский	86	2,5	1	0,4	0,03	0,07	-	-	-	10	1,05
9	Тюменский	97	2	0,3	0,2	-	0,1	-	-	-	0,4	1,1

Практическое занятие 6

Тема: Горение газов

6.1. Температура горения

В топочной практике существует следующая классификация температур горения:

Жаропроизводительность, $^{\circ}\text{C}$:

$$t_{\text{ж}} = \frac{Q_{\text{P}}^{\text{H}}}{\Sigma V_{\text{п.с.}} c}; \quad (6.1)$$

где: Q_{P}^{H} - низшая теплота сгорания газообразного топлива, кДж/м^3 ;

$V_{\text{п.с.}}$ - объемы продуктов сгорания, $\text{нм}^3/\text{нм}^3$

c – средние, объемные теплоемкости продуктов сгорания при $P = \text{const}$ $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{град})$.

Калориметрическая, $^{\circ}\text{C}$

$$t_{\text{л}} = \frac{Q_{\text{P}}^{\text{H}} + t_{\text{м}} \Sigma V_{\text{м}} C_{\text{м}} + \alpha V_0 C_{\text{В}} t_{\text{В}}}{\Sigma V_{\text{п.с.}} C} \quad (6.2)$$

где: $t_{\text{м}}$ и $t_{\text{В}}$ - температура газообразного топлива и воздуха, $^{\circ}\text{C}$

$C_{\text{м}}$ и $C_{\text{В}}$ - соответственно средние объемные теплоемкости газа и воздуха

α - коэффициент избытка воздуха.

Под калориметрической температурой сгорания понимают температуру, до которой нагрелись бы продукты полного сгорания, если бы все тепло топлива и воздуха пошло на их нагревание.

Теоретическая, $^{\circ}\text{C}$:

$$t_{\text{м}} = \frac{Q_{\text{P}}^{\text{H}} + t_{\text{м}} \Sigma V_{\text{м}} C_{\text{м}} + \alpha V_0 C_{\text{В}} t_{\text{В}} - q_{\text{дис}}}{\Sigma V_{\text{п.с.}} C} \quad (6.3)$$

где: $q_{\text{дис}}$ - потери тепла на диссоциацию продуктов полного сгорания, кДж/м^3

Действительная, $^{\circ}\text{C}$

$$t_{\text{д}} = \alpha \cdot t_{\text{м}} \quad (6.4)$$

где: $\alpha = 1.1 - 1.2$

6.2 ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ

6.2.1.

Определить калориметрическую температуру сгорания природного газа следующего состава, %: CH_4 - 98; C_2H_6 - 0,14; C_3H_8 - 0,014; C_4H_{10} - 0,02; CO_2 - 0,5; N_2 - 2,3; $Q_{\text{P}}^{\text{H}} = 35235 \text{ кДж/м}^3$. Температуру газа и воздуха поступающих в топку, принять равной 25°C .

Состав продуктов сгорания и теплоту сгорания взять из табл. 6.1. Состав газа принять для каждого студента по табл. 5.1.

Таблица 6.1.

№ по списку	Состав продуктов сгорания по объему, %						
	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	O ₂	N ₂	Q _p ^H кДж/м ³
0	9,4	0,2	0,1	-	4	86,3	37821
1	9,2	1,6	1,1	0,5	2,4	85,2	38364
2	11,2	-	-	-	1,1	87,7	35695
3	10,4	1,5	1,5	3	-	83,6	33475
4	7	-	-	-	8,5	84,5	35128
5	9,3	0,2	0,1	0,1	3,9	86,4	36664
6	5,6	-	-	-	11	83,4	37404
7	9	-	-	-	5	86,0	38739
8	8,5	0,3	0,2	0,1	5,5	85,4	37124
9	10	-	-	-	3,2	86,8	36722

РЕШЕНИЕ:

Определяем тепло, вносимое в топку топливом и воздухом:

$$I_T = t_T \sum V_T C_T = 25 * (0,98 * 1,573 + 0,0014 * 2,4381 + 0,0004 * 3,1637 + 0,0002 * 4,2728 + 0,005 * 1,625 + 0,013 + 1,2992) = 39 \text{ (кДж/м}^3\text{)}$$

$$I_B = \alpha \cdot V_0 C_B t_B = 1,1 * 10,3 * 1,2976 = 366,4 \text{ (кДж/м}^3\text{)}$$

$$Q_H^C + I_T + I_B = 35235 + 39 + 366,4 = 35640 \text{ (кДж/м}^3\text{)}$$

Как следует из расчета, физическое тепло воздуха и газа составляет весьма малую величину по сравнению с Q_H^p. Эти составляющие будут иметь существенное значение при подогреве газа и воздуха.

2. Определяем t_H. Задаемся t_H = 1890⁰С для того, чтобы найти удельные теплоемкости газов по табл. 16.2 [2]

$$C_{N_2} = 1,4814; C_{O_2} = 1,5609; C_{CO_2} = 2,4058; C_{H_2O} = 1,9402$$

Объем продуктов сгорания составляет:

$$V_{N_2} = 8,153; V_{O_2} = 0,197; V_{CO_2} = 0,9898; V_{H_2O} = 2,095$$

$$t_H = \frac{35640}{8,153 * 1,4814 + 0,197 * 1,5609 + 0,9898 * 2,4058 + 2,095 * 1,9402} = 1890^0\text{C.}$$

Полученная t_к совпадает с принятой, поэтому пересчета не проводим.

6.3. Концентрационные пределы взрываемости газозвудушных смесей.

$$L = \frac{100}{\frac{r_1}{l_1} + \frac{r_2}{l_2} + \dots + \frac{r_n}{l_n}} \quad (6.5)$$

где: L- низший (или высший) предел взрываемости смеси газов;

l₁, l₂ ... l_n - низший (высший) предел взрываемости каждого отдельного газа;

$r_1, r_2 \dots r_n$ - процентное содержание по объему газа в смеси.

ПРИМЕР

6.3.1.

Определить пределы взрываемости смеси воздуха с газом состава: CH_4 - 93,2%; C_2H_6 - 2%; C_3H_8 - 0,4%; N_2 - 4,4%

РЕШЕНИЕ:

Пользуясь данными табл. 8[3] находим:

$$L_{\text{Н}} = \frac{100}{\frac{93,2}{5,3} + \frac{2}{3} + \frac{0,4}{2,1}} = 5,4\%$$

$$L_{\text{ВЕРХ}} = \frac{100}{\frac{93,2}{15} + \frac{2}{14} + \frac{0,4}{9,5}} = 15,5\%$$

6.3.2.

Определить нижний и верхний пределы воспламеняемости газа следующего состава: H_2 - 40%; CO - 10%; CH_4 - 20%; CO_2 - N_2 = 30%.

РЕШЕНИЕ: горючая часть газа составляет $100 - 30 = 70\%$.

Состав горючей части без балластных примесей:

$$\text{H}_2 = \frac{40}{70} * 100 = 57,2\%; \text{CO} = \frac{10}{70} * 100 = 14,3\%; \text{CH}_4 = \frac{20}{70} * 100 = 28,5\%$$

$$L_{\text{Н}}^{\text{Г}} = \frac{100}{\frac{57,2}{4} + \frac{14,3}{12,5} + \frac{28,5}{5}} = 4,7\%$$

$$L_{\text{В}}^{\text{Г}} = \frac{100}{\frac{57,2}{4} + \frac{14,3}{12,5} + \frac{28,5}{5}} = 33\%$$

$$L_{\text{Н}}^{\text{Б}} = 4,7 \frac{(1 + \frac{0,3}{1-0,3})100}{100 + 4,7 \frac{0,3}{1-0,3}} = 6,5\%$$

$$L_{\text{В}}^{\text{Б}} = 33 \frac{(1 + \frac{0,3}{1-0,3})100}{100 + 33 \frac{-0,3}{1-0,3}} = 42\%$$

6.4 Скорость распространения пламени

Можно приближенно определить величину скорости распространения пламени для смеси сложного газа с воздухом:

$$W = \alpha \frac{\frac{r_1 W_1}{l_1} + \frac{r_2 W_2}{l_{21}} + \dots + \frac{r_n W_n}{l_n}}{r_1 + r_2 + \dots + r_n} \quad (6.6)$$

где: W - максимальная скорость распространения пламени сложной газо-воздушной смеси, м/сек;

l - содержание сложного газа в смеси, дающей максимальную скорость распространения пламени, %;

$r_1, r_2 \dots r_n$ - содержание простых газов в техническом газе, %;

W_1, W_2, W_n - максимальная скорость распространения пламени простых газов в газовой смеси, м/с;

$l_1, l_2 \dots l_n$ - содержание простых газов в смеси с воздухом, дающие максимальную скорость распространения пламени, %

Действительную скорость распространения пламени м/сек с учетом содержания в газе балластных примесей можно приближенно определить по следующей формуле:

$$W_d = W * (1 - 0,01N_2 - 0,012CO_2) \quad (6.7)$$

где: W - максимальная скорость распространения пламени горючей смеси, м/сек;

$N_2; CO_2$ - содержание в газе азота и углекислоты, %

ПРИМЕР

6.4.1.

Определить максимальную скорость распространения пламени в трубке диаметром 25 мм сланцевого газа следующего состава: H_2 - 38,75%; CH_4 - 23,86%; CO - 10,91%; C_nH_m - 5,4%; CO_2 - 18,78%; N_2 - 2,0%.

РЕШЕНИЕ: Горючая смесь газа составляет

$$100 - (18,78 + 2) = 79,22\%$$

Состав горючей смеси без балластных примесей

$$H_2 = \frac{38,75}{79,22} * 100 = 49,0\%; \quad CH_4 = \frac{23,86}{79,22} * 100 = 30\%; \quad CO = \frac{10,91}{79,22} * 100 = 30\%; \quad C_nH_m = \frac{5,7}{79,22} * 100 = 7,2\%;$$

По формуле 6.5 определили:

$$L^r = \frac{100}{\frac{49}{38,5} + \frac{30}{9,8} + \frac{13,8}{45} + \frac{7,2}{7,1}} = 18,5\%$$

l_1, l_2, l_n определяются по табл. 50 [3].

Подставляя полученное значение в формулу 6.6 имеем:

$$W = 18,5 * \frac{\left(\frac{49}{38,5} * 4,83 + \frac{30}{9,8} * 0,67 + \frac{13,8}{45} * 1,25 + \frac{7,2}{7,1} * 1,42 \right)}{49 + 30 + 13,8 + 7,2} = 1,75 \text{ м/сек}$$

Действительная скорость определяется:

$$W_{д} = 1,75 * (1 - 0,01 * 2 - 0,012 * 18,78) = 1,3 \text{ м/сек}$$

6.4.2.

Для трубы диаметром 159/150 мм определить максимальную температуру распространения пламени смеси газа состава (0 °С и 760 мм тр. ст):

CH₄ - 25%; C₃H₈ - 1,6%; H₂ - 60%; CO - 4%; CO₂ - 20%; N₂ - 7%; O₂ - 0,4%

Газовая смесь подается при температуре t = 20°С.

РЕШЕНИЕ: Горючая смесь газа в смеси

$$r_2 = 100 - (CO_2 + N_2 + O_2) = 90,6\%$$

Состав горючей части смеси без балластных примесей:

$$CH_4 = 25 * \frac{100}{90,6} = 27,6\%; C_3H_8 = 16 * \frac{100}{90,6} = 1,77\%; H_2 = 60 * \frac{100}{90,6} = 66,2\%;$$

$$CO = 4 * \frac{100}{90,6} = 4,43\%$$

Содержание горючей части газа в смеси, имеющей максимальную скорость распространения пламени, согласно выражению 6,5 и табл. 50 /3/:

$$L = \frac{100}{\frac{27,6}{9,8} + \frac{1,77}{4,6} + \frac{66,2}{38,5} + \frac{4,43}{45}} = 19,8\%$$

Максимальная скорость распространения пламени газовой смеси в трубе диаметром 25 при t = 20 и P = 760 мм.рт.ст. из выражения 6.6 составит:

$$W = 0,01 * 19,8 * \left(\frac{27,6}{9,8} * 0,67 + \frac{1,77}{4,6} * 0,82 + \frac{66,2}{38,5} * 4,85 + \frac{4,43}{45} * 1,25 \right) = 2,15 \text{ м/сек}$$

Действительная скорость с учетом размера трубы (159/150) и балластных примесей:

$$W_{д} = W_{см} \omega [(1 - 0,01 * (N_2 + CO_2))] = 2,15 * 2 * [(1 - 0,01 * (7 + 2))] = 3,9 \text{ м/сек}$$

где: ω - поправка к скорости в трубах разных размеров (рис. 69) [3].

6.5. Отрыв пламени.

Процентное содержание первичного воздуха, при котором происходит отрыв пламени природного газа, может быть приближенно подсчитано по следующей эмпирической формуле:

$$\lg(A \sqrt{R}) = - 0,008B,$$

где A - эмпирический коэффициент, зависящий от диаметра отверстий и вида газа табл. 6.1.

R - отношение действительной удельной тепловой нагрузки к так называемой номинальной нагрузке, равной $4 \cdot 10^6$ ккал/м²;

B - содержание первичного воздуха в смеси, %.

Этой же формулой можно пользоваться для бутана и пропана, заменив величину 0,008 на 0,0084.

Значение коэффициента A от диаметра горелочных отверстий

Таблица 6.2.

Диаметр отверстий, мм	Состав продуктов сгорания по объему, %		
	Природный газ	Бутан	Коксовый газ
4	0,21	0,22	17
3	0,22	0,25	15,5
2	0,24	0,28	15

ПРИМЕР

6.5.1.

Определить процент первичного воздуха в смеси при котором происходит отрыв пламени природного газа, если $d_{\text{огн.отв}} = 4$ мм, а удельная нагрузка $16 \cdot 10^6$ ккал/м²

РЕШЕНИЕ:

$$R = \frac{16 \cdot 10^6}{4 \cdot 10^6} = 4; A = 0,21$$

$$\lg(0,21 \sqrt{4}) = -0,008B; B = \frac{0,377}{0,008} = 47\%$$

Список литературы

1. СНИП 2.04.08-87*. Газоснабжение. Строительные нормы и правила. М.: Стройиздат, 1996. 64 с.
2. СНИП 2.01.01-87. Строительная климатология и геофизика. Нормы проектирования. М.: 1983. 82 с.
3. СНИП II-60-75. Планировка и застройка городов, поселков и сельских населенных пунктов. Нормы проектирования. М.: Стройиздат, 1981. 48 с.
4. Правила безопасности в газовом хозяйстве. Госгортехнадзор РФ. М.: Недра, 2000. 168 с.
5. Ионин А.А. Газоснабжение. М.: Стройиздат, 1989. 434 с.
6. Стаскевич Н.Л. Справочник по сжиженным углеводородным газам. Л.: Недра, 1986. 542 с.
7. Стаскевич Н.Л. Справочник по газоснабжению и использованию газа. Л.: Недра, 1990. 762 с.
8. Газовое оборудование, проблемы, арматура: Справочное руководство. М.: Недра, 1986. 236 с.
9. Газоснабжение района города: Методические указания к курсовому проекту для студентов специальности 290700 "ТТГВ"/Сост. Н.И. Фоминцева. Хабаровск: Хабаровский Государственный Технический Университет, 1988. 24 с.

Приложение А

Таблица 1 – Основные характеристики некоторых газов

Показатель	Оксид углерода	Метан	Этан	Этилен	Пропан	Пропилен	n-Бутан	Изобутан	n-Пентан
Химическая формула	CO	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂
Молекулярная масса М, кг/кмоль	28,0	16,0	30,1	28,1	44,1	42,1	58,1	58,1	72,1
Молекулярный объем V, м ³ /кмоль	17,6	22,4	22,2	22,3	21,9	22	21,5	21,7	20,8
Плотность газовой фазы при н.у. ρ _{г0} , кг/м ³	1,25	0,71	1,35	1,26	2,0	1,91	2,7	2,68	3,46
Плотность жидкой фазы при н.о. ρ _ж , кг/л	1,17	0,42	0,546	0,566	0,528	0,61	0,601	0,582	0,646
Температура кипения t _{кип} , °C	-192	-161	-88,6	-104	-42,1	-47,7	-0,5	-11,73	36,07
Температура плавления t _{пл} , °C	-205	-182,5	-183,3	-169	-187,7	-185,3	-138,3	-193,6	-129,7
Температура критическая t _{кр} , °C	-140	-82,5	32,3	9,9	96,84	94,92	152,01	134,98	196,6
Давление критическое, P _{кр} , МПа	3,45	4,58	4,82	5,03	4,21	4,54	3,747	3,6	3,331

Теплота сгорания , МДж/м ³ : низная Q _Н ^р высшая Q _В ^р	12,68 12,68	35,7 39,1	63,65 69,69	59,53 63,04	91,14 99,17	86,49 91,95	118,53 128,5	118,23 128,28	146,17 158,0
Теплота сгорания , МДж/кг: низная Q _Н ^р высшая Q _В ^р	10,2 10,2	50,08 55,6	47,42 51,92	47,23 51,24	46,3 50,37	46,04 49,95	45,76 49,57	45,68 49,46	45,38 49,3
Скрыта теплота испарения кДж/кг кДж/л	- -	512,4 -	487,2 230,2	483,0 221,8	428,4 220,1	441,0 241,1	390,6 229,7	382,2 215,0	361,2 -

Оглавление

1 Практическое занятие №1. Тема: Основные свойства и состав газообразного топлива. Основные законы газового состояния	3
2 Практическое занятие №2. Тема: Установки сжиженного газа. Точка росы	12
3 Практическое занятие №3. Тема: Диаграмма состояния	17
4 Практическое занятие №4. Тема: Методы наполнения хранилищ	22
5 Практическое занятие №5. Тема: Горение газов	24
6 Практическое занятие №6. Тема: Горение газов	27
Литература	33
Приложение А. Таблица 1	34
Оглавление	36

СБОРНИК ЗАДАЧ И УПРАЖНЕНИЙ ПО КУРСУ «ГАЗОСНАБЖЕНИЕ»

Методические указания к практическим занятиям
для студентов специальности 290700

Наталья Ивановна Фоминцева

Главный редактор Л.А. Суевалова
Редактор О.В. Астафьева
Компьютерная верстка Е.А. Воропаевой
М.Г. Бутина

Подписано в печать Формат 60x84 1/16
Бумага писчая. Гарнитура «Таймс». Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,1.
Уч.-изд. л. 1,8. Тираж 200 экз. Заказ С92.

Издательство Хабаровского государственного технического университета.
680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.

Отдел оперативной полиграфии издательства Хабаровского государственного
технического университета. 680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.