

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИШПР
_____ А.С. Боев
« __ » _____ 2025 г.

Н.И. Кривцова

**ВЫЧИСЛЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ПРИРОДНОГО ГАЗА**

*Методические указания к выполнению лабораторных работ
по курсам «Технология переработки нефти и газа» по направлению
18.03.01 Химическая технология*

Издательство
Томского политехнического университета
2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	3
2. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ГАЗОВОГО ХРОМАТОГРАФА	6
3. ВЫЧИСЛЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА	8
3.1. Вычисление теплоты сгорания	8
3.2. Вычисление плотности, относительной плотности и числа Воббе	10
4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	11
5. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА	12
6. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ	13
ЛИТЕРАТУРА	18
Приложение 1	19

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Хроматография – физический метод разделения, в котором разделяемые компоненты распределены между двумя фазами, одна из которых является неподвижной (стационарная или неподвижная фаза), в то время как другая (подвижная фаза) движется в определенном направлении.

Неподвижная жидкая фаза - это фаза, определяющая селективные взаимодействия между компонентами пробы и твердым носителем, т.е. определяет последовательность выхода из колонки и отношение времен удерживания максимумов их зон, а также характер размывания хроматографических зон. В качестве неподвижной фазы в газовой хроматографии применяют твердый адсорбент, или жидкость, нанесенная в виде тонкой пленки на адсорбционно-инертный твердый носитель. Эффективность хроматографического разделения во многом зависит от выбора неподвижной фазы. Правильный выбор неподвижной фазы в свою очередь зависит от природы анализируемого вещества. При выборе стационарной фазы следует учитывать, что неполярные вещества лучше разделяются на неполярных фазах. В капиллярных колонках неподвижная жидкая фаза наносится в виде тонкой пленки на внутренние стенки капилляра. При этом сама трубка остается по существу “поллой”. В насадочных применяют жидкость нанесенную в виде тонкой пленки на адсорбционно-инертный твердый носитель. К неполярным сорбентам относят активированный уголь. Силикагель, молекулярные сита, оксид алюминия применяют как полярные адсорбенты. Полисорбы, поропаксы подразделяются на сорбенты средней полярности и неполярные. Сильное влияние на качество разделения оказывают водородные связи, которые возникают между анализируемым веществом и жидкой фазой.

В качестве подвижной фазы используют газ-носитель. Природа газа носителя оказывает влияние на работу детектора и характеристики колонки. Помимо обеспечения высокой чувствительности детектора, газ носитель должен быть инертным по отношению к разделяемым веществам и сорбенту, иметь небольшую вязкость для поддержания минимального перепада давления в колонке, быть взрывобезопасным и достаточно дешевым. На практике нашли применение азот, водород, гелий, аргон, углекислый газ, воздух.

Характерными особенностями любых хроматографических методов являются следующие:

- высокая разрешающая способность процесса разделения;
- мягкие условия разделения.

Основные задачи:

- разделение многокомпонентных по составу смесей на индивидуальные компоненты;
- концентрирование веществ из их очень разбавленных растворов;

- очистка технических продуктов, доведение этих продуктов до заданной степени химической чистоты, получение чистых химических реактивов;

- проверка вещества на однородность, на чистоту;

- контроль различных производств методами хроматографии.

В основу классификаций хроматографических методов положены принципы, учитывающие следующие различные особенности процесса разделения:

- различия в агрегатном состоянии фаз используемой хроматографической системы (Таб.1);

- различия в характере взаимодействий разделяемых веществ с неподвижной фазой (Табл.2);

- экспериментальные различия в способах проведения процесса хроматографического разделения (Табл.3).

Таблица 1

Варианты хроматографии, различающиеся по агрегатному состоянию фаз

Подвижная фаза	Неподвижная фаза	Название варианта	
		общее	частное
газ	абсорбент	газовая	газо-абсорбционная
	жидкость		газо-жидкостная
жидкость	абсорбент	жидкостная	жидкостно-абсорбционная
	жидкость		жидкостно-жидкостная
газ или пар в сверхкритическом состоянии	абсорбент	флюидная	флюидно-абсорбционная
	жидкость		флюидно-жидкостная
Коллоидная система	Композиция твердых и жидких компонентов	полифазная	

Таблица 2

Варианты хроматографии, различающиеся по характеру взаимодействий разделяемых соединений с неподвижной фазой

Механизм процесса разделения	Название процесса
по размеру молекул	ситовая хроматография
за счет физической адсорбции	молекулярная хроматография
за счет растворения	распределительная хроматография
за счет ионного обмена	ионообменная хроматография
за счет образования водородной связи, проявления химического сродства и другое	хемосорбционная хроматография
за счет образования координационных связей разделяемых органических молекул с катионами металлов в привитых на поверхности адсорбента группах (лигандах)	лигандообменная хроматография
за счет образования прочного комплекса только одним из разделяемых компонентов с привитой специфической группой неподвижной фазы	аффинная хроматография

Таблица 3

Варианты хроматографии, различающиеся по способу проведения процесса разделения

Способ проведения процесса разделения	Название варианта
В цилиндрическом слое сорбента	колоночная хроматография
в слое сорбента на плоской поверхности	хроматография в тонких слоях
в пленке жидкости, содержащейся в полоске бумаги	хроматография на бумаге
в пленке жидкости или тонком слое адсорбента, размещенном на внутренней стенке капилляра	капиллярная хроматография
в полях электрических, магнитных, центробежных и других сил	хроматография в полях сил

2. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ГАЗОВОГО ХРОМАТОГРАФА

Газовый хроматограф представляет собой прибор, использующий принцип хроматографии в системах газ-адсорбент или газ-жидкость. В аппаратном оформлении это совокупность нескольких самостоятельных, параллельно функционирующих систем: источник газа-носителя и блок подготовки газов, испаритель, термостат колонок и сами хроматографические колонки, детектор, система регистрации и обработки данных. Типичная блок-схема газового хроматографа изображена на рисунке 1.

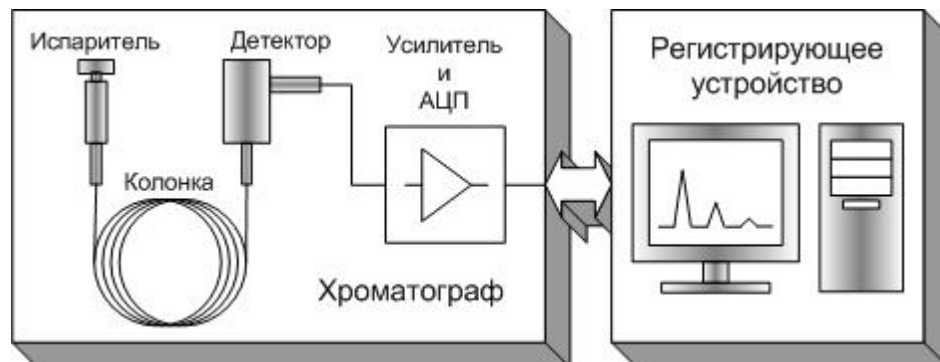


Рис. 1 Принципиальная схема газового хроматографа:

Устройство ввода (рис. 1) подает в поток газа-носителя определенное количество анализируемой смеси в газообразном состоянии непосредственно перед колонкой. В хроматографической колонке осуществляется разделение смеси на отдельные составляющие компоненты за счет процессов сорбции и десорбции веществ на неподвижной фазе. При этом слабо сорбируемые вещества, будут переноситься подвижной фазой по колонке с большей скоростью и наоборот. Из колонки разделенные компоненты смеси попадают в детектор.

Детектор регистрирует присутствие веществ, отличающихся по физическим или физико-химическим свойствам от газа-носителя, и преобразует возникающие изменения в электрический сигнал. Далее происходит усиление и аналого-цифровое преобразование полученного сигнала. Регистрирующий прибор (компьютер или самописец) строит график зависимости сигнала детектора от времени, называемый хроматограммой (Рис.2).

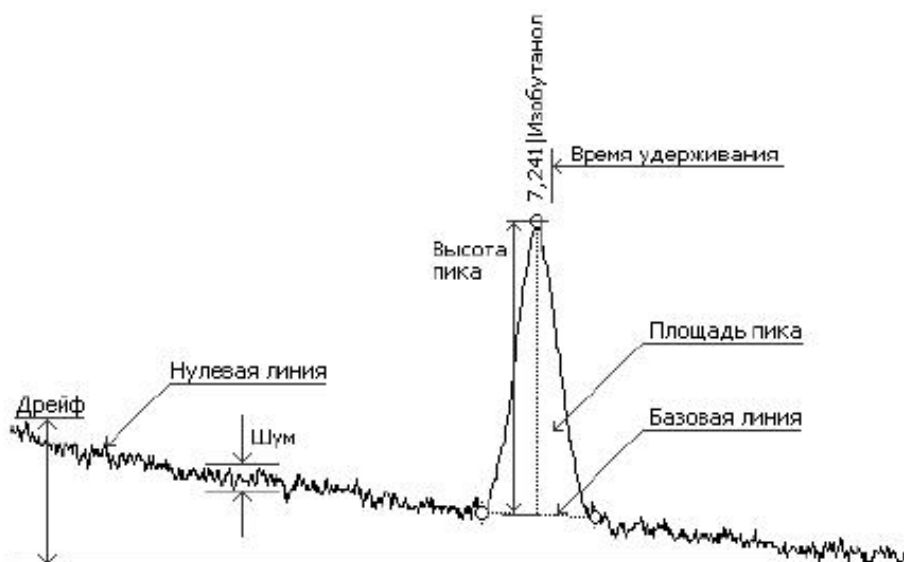


Рис. 2 Типичная дифференциальная хроматограмма индивидуального вещества и несорбируемого газа

Прохождение в детекторе газа-носителя без пробы на хроматограмме отражается фоновым сигналом детектора, который называется нулевой линией. Нулевая линия имеет высокочастотные колебания – шум. Изменение сигнала нулевой линии детектора во времени называется дрейфом. При прохождении через детектор анализируемого компонента происходит отклонение уровня сигнала детектора от нулевой линии. Это отклонение отображается на хроматограмме в виде пика.

Исходными экспериментальными данными, с помощью которых выполняется качественный газохроматографический анализ, являются элюционные характеристики: время удерживания, объем удерживания и соответствующий им отрезок на хроматограмме - расстояние удерживания.

Время удерживания (t_R) - это время, прошедшее от момента ввода пробы до выхода максимума концентрации определяемого компонента. Время удерживания – качественная характеристика анализируемого компонента, площадь и высота – количественные характеристики.

Площадь – область, ограниченная профилем пика и базовой линией.

Высота – расстояние от вершины пика до базовой линии.

Расстояние удерживания (l_R) — это расстояние на хроматограмме от момента ввода пробы до выхода пика определяемого компонента.

Удерживаемый объем (V_R) — это объем газа-носителя (в см^3), прошедший через хроматографическую колонку от момента ввода пробы до момента выхода максимальной концентрации определяемого вещества, измеренный при давлении и температуре на выходе из колонки.

Объемная скорость газа-носителя - объем газа-носителя, протекающего за единицу времени через пенный расходомер, т.е. на выходе из колонки и при температуре колонки.

3. ВЫЧИСЛЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Методы вычисления значений физико-химических показателей качества горючих газов основаны на результатах определения компонентного состава методом газовой хроматографии, позволяющим измерить содержание всех важных компонентов за исключением воды.

Свойства газа являются аддитивными; при расчете «суммарного значения» свойства моля идеального природного газа значения термодинамических свойств индивидуальных компонентов берут с весами в соответствии со значениями их молярной доли. Значения теплоты сгорания, рассчитанные на основе значений объемной доли компонентов, затем пересчитывают в значения для реального газа, используя поправочный коэффициент, учитывающий неидеальность газовой смеси (коэффициент сжимаемости смеси).

Цель работы: рассчитать высшую и низшую теплоту сгорания газа, относительную плотность и число Воббе, используя хроматографию природного газа.

3.1. Вычисление теплоты сгорания

Наиболее важными фундаментальными физическими величинами, необходимыми при вычислении значений теплоты сгорания, исходя из принципа, положенного в основу метода, являются (стандартные) молярные энтальпии сгорания для идеальных газов – компонентов смеси. Эти величины являются сложными функциями температуры; следовательно, необходимые значения зависят от стандартной температуры сгорания t_1 .

Для значения теплоты сгорания, рассчитанного по любому из трех возможных вариантов, в принципе, требуется так называемая энтальпийная поправка для того, чтобы пересчитать энтальпию идеального газа при сгорании газовой смеси в значение, соответствующее реальному газу. Однако она обычно настолько мала, что ею можно пренебречь.

Для значения объемной теплоты сгорания требуется вторая поправка,

учитывающая отличие объема моля реального газа от объема моля идеального газа, этой поправкой пренебрегать нельзя. Она требуется также при вычислении значений плотности, относительной плотности и числа Воббе.

Такие поправки на объем, обусловленные неидеальностью газа, вводят с помощью коэффициента сжимаемости Z_{mix} . Коэффициент сжимаемости Z_{mix} для стандартных условий измерений, рассчитывают по следующей формуле

$$Z_{\text{mix}}(t_2, p_2) = 1 - \left[\sum_{j=1}^N (x_j \cdot \sqrt{b_j}) \right]^2 \quad (1)$$

где суммирование проводят по всем N компонентам смеси. Значения так называемого коэффициента суммирования $\sqrt{b_j}$ приведены в таблице 2 Приложение 1, для трех стандартных условий измерений, представляющих общий интерес, для всех компонентов природного газа и имитатора природного газа, рассматриваемых в ГОСТ 31369–2008 Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава. Приведены также значения коэффициентов сжимаемости всех чистых компонентов (или гипотетического коэффициента сжимаемости) Z_j , на основе которых были получены значения b_j , исходя из соотношения $b_j = 1 - Z_j$.

Значение *молярной теплоты сгорания идеального газа*, определяемое исходя из значений молярной доли компонентов смеси известного состава, при температуре t_1 вычисляют по формуле

$$\bar{H}^\circ(t_1) = \sum_{j=1}^N [x_j \cdot \bar{H}_j^\circ(t_1)] \quad (2)$$

где $\bar{H}^\circ(t_1)$ – значение идеальной теплоты сгорания смеси (высшей или низшей);

x_j – молярная доля j -го компонента;

$\bar{H}_j^\circ(t_1)$ – значение идеальной теплоты сгорания j -го компонента (высшей или низшей).

Числовые значения $\bar{H}_j^\circ(t_1)$ приведены в Таблице 3, Приложение 1.

Значение молярной теплоты сгорания реального газа принимается численно равным соответствующему значению теплоты сгорания для идеального газа.

Значение теплоты сгорания идеального газа, рассчитанное на основе значений объемной доли компонентов, для температуры сгорания t_1 , смеси известного состава, измеренных при температуре t_2 и давлении p_2 , вычисляют

по формуле

$$\tilde{H}^{\circ}[t_1, V(t_2, p_2)] = \bar{H}^{\circ}(t_1) \cdot \frac{p_2}{R \cdot T_2} \quad (3)$$

где $\tilde{H}^{\circ}[t_1, V(t_2, p_2)]$ – значение идеальной (высшей или низшей) объемной теплоты сгорания смеси;

R – универсальная газовая постоянная;

$T_2 = (t_2 + 273,15)$ – абсолютная температура, К.

Значение объемной теплоты сгорания газа для температуры сгорания смеси известного состава, объемная доля компонентов которой измерена при температуре t_2 и давлении p_2 , вычисляют по формуле:

$$\tilde{H}[t_1, V(t_2, p_2)] = \frac{\tilde{H}^{\circ}[t_1, V(t_2, p_2)]}{Z_{mix}(t_2, p_2)} \quad (4)$$

где $\tilde{H}[t_1, V(t_2, p_2)]$ – значение идеальной (высшей или низшей) объемной теплоты сгорания смеси;

$Z_{mix}(t_2, p_2)$ – коэффициент сжимаемости смеси при стандартных условиях измерений.

Коэффициент сжимаемости $Z_{mix}(t_2, p_2)$ вычисляют по формуле (1).

3.2. Вычисление плотности, относительной плотности и числа Воббе

Относительная плотность идеального газа не зависит от выбора стандартного состояния, и ее вычисляют по формуле

$$d^{\circ} = \sum_{j=1}^N x_j \cdot \frac{M_j}{M_{air}} \quad (5)$$

где d° – относительная плотность идеального газа;

M_j – молярная масса j -го компонента;

M_{air} – молярная масса сухого воздуха стандартного состава.

M_{air} равно 28,9626 кг·кмоль⁻¹

Молярная масса компонентов приведена в Таблице 1, Приложение 1.

Относительную плотность реального газа вычисляют по формуле:

$$d(t, p) = \frac{d^{\circ} \cdot Z_{air}(t, p)}{Z_{mix}(t, p)} \quad (6)$$

где $d(t, p)$ – относительная плотность реального газа;

$Z_{air}(t, p)$ – коэффициент сжимаемости сухого воздуха стандартного состава; $Z_{air}(293,15 \text{ К}, 101,325 \text{ кПа}) = 0,99963$.

$Z_{\text{mix}}(t, p)$ – коэффициент сжимаемости газа.

Плотность идеального газа зависит от его температуры t и давления p , и ее вычисляют по формуле:

$$\rho^{\circ}(t, p) = \left(\frac{p}{R \cdot T} \right) \sum_{j=1}^N [x_j \cdot M_j] \quad (7)$$

где $\rho^{\circ}(t, p)$ – плотность идеального газа;

R – универсальная газовая постоянная,

$T = (t + 273,15)$ – абсолютная температура, К.

Плотность реального газа вычисляют по формуле:

$$\rho(t, p) = \frac{\rho^{\circ}(t, p)}{Z_{\text{mix}}(t, p)} \quad (8)$$

где $\rho(t, p)$ — плотность реального газа.

Число Воббе идеального газа вычисляют по формуле:

$$W^{\circ}[t_1, V(t_2, p_2)] = \frac{\tilde{H}_s[t_1, V(t_2, p_2)]}{\sqrt{d^{\circ}}} \quad (9)$$

Число Воббе реального газа вычисляют по формуле:

$$W[t_1, V(t_2, p_2)] = \frac{\tilde{H}_s[t_1, V(t_2, p_2)]}{\sqrt{d(t_2, p_2)}}$$

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Физическая сущность метода газовой хроматографии.
2. Устройство и принцип действия хроматографа.
3. Назначение хроматографической колонки.
4. Типы хроматографических колонок?
5. Назначение детектора.
6. Назначение регистратора.
7. Требования к газу–носителю.
8. Что такое «время удерживания»?
9. Что такое «относительное время удерживания»?
10. Как определить качественный состав газа по хроматограмме?
11. Как определить площадь пика хроматограммы?
12. Как вычислить плотность газа по его компонентному составу?

13. Какой метод хроматографии используется для разделения углеводородных компонентов природного газа?
14. Какое значение расчётных показателей выше: для реального или для идеального газа? Почему?

5. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе оформляется один на группу студентов (2-4 студента) выполняющих одновременно одну лабораторную работу, однако в нем приводятся варианты заданий и ход выполнения для всех исполнителей, если для каждого студента предусмотрен свой вариант. Отчет по лабораторной работе должен соответствовать основным требованиям ГОСТ, предъявляемым к технической документации. Отчёт по лабораторной работе выполняется на листах белой бумаги формата А4 в печатном или рукописном виде.

При оформлении отчёта используется сквозная нумерация страниц, считая титульный лист первой страницей. Номер страницы на титульном листе не ставится.

При оформлении отчёта в печатном виде желательно соблюдать следующие требования. Для заголовков: полужирный шрифт, 14 пт, центрированный. Для основного текста: нежирный шрифт, 14 пт, выравнивание по ширине. Во всех случаях тип шрифта – Times New Roman, отступ абзаца 1.25 см, полуторный междустрочный интервал. Поля: левое – 3 см, правое – 1 см, верхнее и нижнее – 2 см.

В отчет по лабораторной работе должны быть включены следующие пункты:

- титульный лист – оформляется в соответствии с образцом;
- цель работы;
- краткие теоретические сведения – приводится краткое описание исследуемых явлений;
- описание экспериментальной установки и методики эксперимента – сведения об используемом при проведении работы лабораторном оборудовании, ход работы;
- экспериментальные результаты – экспериментальные данные в виде таблиц и/или графиков;
- анализ результатов работы – приводятся результаты обработки экспериментальных данных, результаты расчетов, графики полученных зависимостей, иные требуемые методическими указаниями данные;
- выводы – оценивается степень соответствия полученных результатов расчетов и экспериментов с теоретическими данными, дается объяснение полученных в ходе работы зависимостей и результатов.

По завершении выполнения лабораторной работы отчет по лабораторной работе подписывается преподавателем.

6. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Анализ природного газа проводился на хроматографе Хроматек 5000, при следующих параметрах: температура сгорания 25 °С; температура измерения 20 °С; давление 101,325 кПа.

Вариант 1

Входные данные, мол. %		
Название	Концентрация	
	1016.1	1016.2
Кислород	0,04082	0,03166
Азот	2,210	2,149
Диоксид углерода	2,578	2,568
Этан	4,878	4,834
Пропан	6,778	6,838
и-Бутан	1,878	1,962
н-Бутан	2,723	2,934
нео-Пентан	0,005073	0,005422
и-Пентан	0,8168	0,9658
н-Пентан	0,6333	0,7990
циклопентан	0,04075	0,06037
2,2 диметилбутан	0,0002583	0,0002643
2,3 диметилбутан + изогексан	0,08653	0,1267
н-Гексан	0,07808	0,1595
бензол + циклогексан	0,01520	0,03239
2-метилгексан	0,003039	0,005506
3-метилгексан	0,03908	0,08891
н-Гептан	0,001322	0,004887
метилциклогексан	0,007929	0,02231
толуол	0,002663	0,008038
2-метилгептан	0,002917	0,01171

Вариант 2

Входные данные, мол. %

Название	Концентрация	
	1015.1	1015.2
Кислород	0,03064	0,03427
Азот	2,374	2,365
Диоксид углерода	1,540	1,512
Этан	4,945	4,953
Пропан	5,416	5,439
и-Бутан	0,9429	0,9477
н-Бутан	1,722	1,734
нео-Пентан	0,001415	0,001840
и-Пентан	0,3460	0,3544
н-Пентан	0,3168	0,3257
циклопентан	0,02119	0,02325
2,3 диметилбутан + изорексан	0,03222	0,03389
н-Гексан	0,04536	0,04904
бензол + циклогексан	0,006143	0,008426
2-метилгексан	0,002569	0,001256
3-метилгексан	0,01828	0,02121
н-Гептан	0,0009156	0,001046
метилциклогексан	0,003058	0,005547
толуол	0,0004053	0,001806
2-метилгептан	0,001737	0,0008153
н-Октан	0,0002210	0,0001107

Вариант 3

Входные данные, мол. %

Название	Концентрация	
	1017.1	1017.2
Кислород	0,02523	0,03958
Азот	3,108	3,171
Диоксид углерода	2,199	2,216
Этан	5,102	5,132
Пропан	7,035	7,017
и-Бутан	1,365	1,353
н-Бутан	2,565	2,484
нео-Пентан	0,003004	0,002974
и-Пентан	0,5540	0,5245
н-Пентан	0,5210	0,4645
циклопентан	0,03931	0,03112
2,2 диметилбутан	0,0001543	0,0001585
2,3 диметилбутан + изогексан	0,05918	0,05010
н-Гексан	0,09520	0,05563
бензол + циклогексан	0,01655	0,009605
2-метилгексан	0,002380	0,001767
3-метилгексан	0,04355	0,02511
н-Гептан	0,003301	0,001025
метилциклогексан	0,01283	0,005742
толуол	0,004487	0,001989
2-метилгептан	0,008477	0,002803

Вариант 4

Входные данные, мол. %

Название	Концентрация	
	858.1	858.2
Кислород	0,02471	0,03344
Диоксид углерода	1,715	1,645
Азот	1,590	1,550
Этан	6,773	6,748
Пропан	11,26	11,24
и-Бутан	1,620	1,633
н-Бутан	5,588	5,643
нео-Пентан	0,004468	0,004561
и-Пентан	0,7237	0,7519
н-Пентан	0,8651	0,8916
циклопентан	0,07280	0,07413
2,2 диметилбутан	0,0002651	0,0002927
2,3 диметилбутан + изопексан	0,08540	0,09046
н-Гексан	0,1541	0,1446
бензол + циклогексан	0,03277	0,02952
2-метилгексан	0,003424	0,003537
3-метилгексан	0,05475	0,05027
н-Гептан	0,004206	0,002744
метилциклогексан	0,01575	0,01215
толуол	0,003920	0,003059
2-метилгептан	0,006742	0,004277

Вариант 5

Входные данные, мол. %

Название	Концентрация	
	912.1	912.2
Кислород	1,245	1,235
Диоксид углерода	2,379	2,378
Азот	6,618	6,585
Этан	4,582	4,583
Пропан	6,631	6,637
и-Бутан	1,852	1,854
и-Бутан	2,862	2,866
нео-Пентан	0,007333	0,004943
и-Пентан	0,8939	0,8941
н-Пентан	0,7620	0,7631
циклопентан	0,05945	0,05978
2,3 диметилбутан + изогексан	0,1147	0,1152
н-Гексан	0,1862	0,1865
бензол + циклогексан	0,03985	0,03931
2-метилгексан	0,005408	0,005507
3-метилгексан	0,1074	0,1083
н-Гептан	0,01522	0,01497
метилциклогексан	0,04110	0,04047
толуол	0,01659	0,01497
2-метилгептан	0,01130	0,01240

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахметов С.А. Технология глубокой переработки нефти и газа : учебное пособие для вузов / С. А. Ахметов. — 2-е изд., перераб. и доп.. — Санкт-Петербург: Недра, 2013. — 541 с.
2. Эрих В.Н., Расина М.Г. Химия и технология нефти и газа. Л.: Химия, 2010. — 368 с.
3. Нефть и газ Западной Сибири: материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 55-летию Тюменского государственного нефтегазового университета. Т.1; отв. ред. О. Ф. Данилов. — Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. — 328 с
4. Илларионова, Е. А. Газовая хроматография. Теоретические основы метода : учебное пособие / Е. А. Илларионова, И. П. Сыроватский ; ФГБОУ ВО ИГМУ Минздрава России, Кафедра фармацевтической и токсикологической химии. — Иркутск : ИГМУ, 2018. — 52 с.

Приложение 1

Таблица 1 — Молярные массы компонентов природного газа

Компонент	Значение, кг · кмоль ⁻¹	Компонент	Значение, кг · кмоль ⁻¹
1 Метан	16,043	5 2-Метилпропан	58,123
2 Этан	30,070	6 <i>n</i> -Пентан	72,150
3 Пропан	44,097	7 2-Метилбутан	72,150
4 <i>n</i> -Бутан	58,123	8 2,2-Диметилпропан	72,150
9 <i>n</i> -Гексан	86,177	35 Бензол	78,114
10 2-Метилпентан	86,177	36 Толуол	92,141
11 3-Метилпентан	86,177	37 Этилбензол	106,167
12 2,2-Диметилбутан	86,177	38 <i>o</i> -Ксилол	106,167
13 2,3-Диметилбутан	86,177		
14 <i>n</i> -Гептан	100,204	39 Метанол	32,042
15 <i>n</i> -Октан	114,231	40 Метантиол	48,109
16 <i>n</i> -Нонан	128,258		
17 <i>n</i> -Декан	142,285	41 Водород	2,015 9
		42 Вода	18,015 3
18 Этилен	28,054	43 Сульфид водорода	34,082
19 Пропилен	42,081	44 Аммиак	17,030 6
20 1-Бутен	56,108	45 Цианид водорода	27,026
21 <i>цис</i> -2-Бутен	56,108	46 Моноксид углерода	28,010
22 <i>транс</i> -2-Бутен	56,108	47 Карбонилсульфид	60,076
23 2-метилпропен	56,108	48 Дисульфид углерода	76,143
24 1-Пентен	70,134		
		49 Гелий	4,002 6
25 Пропадиен	40,065	50 Неон	20,179 7
26 1,2-Бутадиен	54,092	51 Аргон	39,948
27 1,3-Бутадиен	54,092	52 Азот	28,013 5
		53 Кислород	31,998 8
28 Ацетилен	26,038	54 Диоксид углерода	44,010
		55 Диоксид серы	64,065
29 Циклопентан	70,134	56 Моноксид диазота	44,012 9
30 Метилциклопентан	84,161	57 Криптон	83,80
31 Этилциклопентан	98,188	58 Ксенон	131,29
32 Циклогексан	84,161	Воздух	28,962 6
33 Метилциклогексан	98,188		
34 Этилциклогексан	112,215		

П р и м е ч а н и е — Значения молярной массы численно равны значениям относительной молекулярной массы, полученной с помощью использования относительных атомных масс для основных входящих элементов, где цифра в скобках является неопределенностью в последней приводимой цифре [2].

C 12,011 (1)

H 1,007 94 (7)

O 15,999 4 (3)

N 14,006 74 (7)

S 32,066 (6)

Для соединений, содержащих C и/или S, приведенная молярная масса была округлена до третьего десятичного знака; для других соединений приводится четвертый десятичный знак. Значение для осушенного воздуха стандартного состава приведено в таблице В.2 (приложение В) также до четвертого десятичного знака.

Таблица 2 — Коэффициенты сжимаемости и коэффициенты суммирования для компонентов природного газа для различных стандартных условий измерений

Компонент	0 °C, 101,325 кПа		15 °C, 101,325 кПа		20 °C, 101,325 кПа	
	Z	$\sqrt{b}$	Z	$\sqrt{b}$	Z	$\sqrt{b}$
1 Метан	0,997 6	0,049 0	0,998 0	0,044 7	0,998 1	0,043 6
2 Этан	0,990 0	0,100 0	0,991 5	0,092 2	0,992 0	0,089 4
3 Пропан	0,978 9	0,145 3	0,982 1	0,133 8	0,983 4	0,128 8
4 <i>n</i> -Бутан	0,957 2	0,206 9	0,965 0	0,187 1	0,968 2	0,178 3
5 2-Метилпропан	0,958	0,204 9	0,968	0,178 9	0,971	0,170 3
6 <i>n</i> -Пентан	0,918	0,286 4	0,937	0,251 0	0,945	0,234 5
7 2-Метилбутан	0,937	0,251 0	0,948	0,228 0	0,953	0,216 8
8 2,2-Диметилпропан	0,943	0,238 7	0,955	0,212 1	0,959	0,202 5
9 <i>n</i> -Гексан	0,892	0,328 6	0,913	0,295 0	0,919	0,284 6
10 2-Метилпентан	0,898	0,319 4	0,914	0,293 3	0,926	0,272 0
11 3-Метилпентан	0,898	0,319 4	0,917	0,288 1	0,928	0,268 3
12 2,2-Диметилбутан	0,916	0,289 8	0,931	0,262 7	0,935	0,255 0
13 2,3-Диметилбутан	0,910	0,300 0	0,925	0,273 9	0,934	0,256 9
14 <i>n</i> -Гептан	0,830	0,412 3	0,866	0,366 1	0,876	0,352 1
15 <i>n</i> -Октан	0,742	0,507 9	0,802	0,445 0	0,817	0,427 8
16 <i>n</i> -Нонан	0,613	0,622 1	0,710	0,538 5	0,735	0,514 8
17 <i>n</i> -Декан	0,434	0,752 3	0,584	0,645 0	0,623	0,614 0
18 Этилен	0,992 5	0,086 6	0,993 6	0,080 0	0,994 0	0,077 5
19 Пропилен	0,981	0,137 8	0,984	0,126 5	0,985	0,122 5
20 1-Бутен	0,965	0,187 1	0,970	0,173 2	0,972	0,167 3
21 <i>цис</i> -2-Бутен	0,961	0,197 5	0,967	0,181 7	0,969	0,176 1
22 <i>транс</i> -2-Бутен	0,961	0,197 5	0,968	0,178 9	0,969	0,176 1
23 2-Метилпропен	0,965	0,187 1	0,971	0,170 3	0,972	0,167 3
24 1-Пентен	0,938	0,249 0	0,949	0,225 8	0,952	0,219 1
25 Пропадиен	0,980	0,141 4	0,983	0,130 4	0,984	0,126 5
26 1,2-Бутадиен	0,955	0,212 1	0,963	0,192 4	0,965	0,187 1
27 1,3-Бутадиен	0,966	0,184 4	0,971	0,170 3	0,973	0,164 3
28 Ацетилен	0,991	0,094 9	0,993	0,083 7	0,993	0,083 7
29 Циклопентан	0,935	0,255 0	0,947	0,230 2	0,950	0,223 6
30 Метилциклопентан	0,902	0,313 0	0,921	0,281 1	0,927	0,270 2
31 Этилциклопентан	0,841	0,398 7	0,876	0,352 1	0,885	0,339 1
32 Циклогексан	0,897	0,320 9	0,918	0,286 4	0,924	0,275 7
33 Метилциклогексан	0,855	0,380 8	0,886	0,337 6	0,894	0,325 6
34 Этилциклогексан	0,770	0,479 6	0,824	0,419 5	0,838	0,402 5
35 Бензол	0,909	0,301 7	0,926	0,272 0	0,936	0,253 0
36 Толуол	0,849	0,388 6	0,883	0,342 1	0,892	0,328 6
37 Этилбензол	0,764	0,485 8	0,823	0,420 7	0,837	0,403 7
38 <i>о</i> -Ксилол	0,737	0,512 8	0,804	0,442 7	0,821	0,423 1
39 Метанол	0,773	0,476 4	0,872	0,357 8	0,892	0,328 6
40 Метантиол	0,972	0,167 3	0,977	0,151 7	0,978	0,148 3
41 Водород	1,000 6	−0,004 0	1,000 6	−0,004 8	1,000 6	−0,005 1
42 Вода	0,930	0,264 6	0,945	0,234 5	0,952	0,219 1
43 Сульфид водорода	0,990	0,100 0	0,990	0,100 0	0,990	0,100 0
44 Аммиак	0,985	0,122 5	0,988	0,109 5	0,989	0,104 9
45 Цианид водорода	0,887	0,336 2	0,912	0,296 6	0,920	0,282 8
46 Моноксид углерода	0,999 3	0,026 5	0,999 5	0,022 4	0,999 6	0,020 0
47 Карбонил сульфид	0,985	0,122 5	0,987	0,114 0	0,988	0,109 5
48 Дисульфид углерода	0,954	0,214 5	0,962	0,194 9	0,965	0,187 1
49 Гелий	1,000 5	0,000 6	1,000 5	0,000 2	1,000 5	0,000 0
50 Неон	1,000 5	0,000 6	1,000 5	0,000 2	1,000 5	0,000 0
51 Аргон	0,999 0	0,031 6	0,999 2	0,028 3	0,999 3	0,026 5
52 Азот	0,999 5	0,022 4	0,999 7	0,017 3	0,999 7	0,017 3
53 Кислород	0,999 0	0,031 6	0,999 2	0,028 3	0,999 3	0,026 5
54 Диоксид углерода	0,993 3	0,081 9	0,994 4	0,074 8	0,994 7	0,072 8
55 Диоксид серы	0,976	0,154 9	0,979	0,144 9	0,980	0,141 4
Воздух	0,999 41	—	0,999 58	—	0,999 63	—

Таблица 3 — Значения молярной теплоты сгорания компонентов природных газов при различных стандартных условиях сгорания для идеального газа

Компонент	Значение идеальной молярной теплоты сгорания компонента $\bar{H}^{\circ}$, кДж · моль ⁻¹							
	25 °С		20 °С		15 °С		0 °С	
	Высшее	Низшее	Высшее	Низшее	Высшее	Низшее	Высшее	Низшее
1 Метан	890,63	802,60	891,09	802,65	891,56	802,69	892,97	802,82
2 Этан	1560,69	1428,64	1561,41	1428,74	1562,14	1428,84	1564,34	1429,12
3 Пропан	2219,17	2043,11	2220,13	2043,23	2221,10	2043,37	2224,01	2043,71
4 <i>n</i> -Бутан	2877,40	2657,32	2878,57	2657,45	2879,76	2657,60	2883,82	2658,45
5 2-Метилпропан	2868,20	2648,12	2869,38	2648,26	2870,58	2648,42	2874,20	2648,83
6 <i>n</i> -Пентан	3535,77	3271,67	3537,17	3271,83	3538,60	3272,00	3542,89	3272,45
7 2-Метилбутан	3528,83	3264,73	3530,24	3264,89	3531,68	3265,08	3535,98	3265,54
8 2,2-Диметилпропан	3514,61	3250,51	3516,01	3250,67	3517,43	3250,83	3521,72	3251,28
9 <i>n</i> -Гексан	4194,95	3886,84	4196,58	3887,01	4198,24	3887,21	4203,23	3887,71
10 2-Метилпентан	4187,32	3879,21	4188,95	3879,38	4190,62	3879,59	4195,61	3880,09
11 3-Метилпентан	4189,90	3881,79	4191,54	3881,97	4193,22	3882,19	4198,24	3882,72
12 2,2-Диметилбутан	4177,52	3869,41	4179,15	3869,59	4180,83	3869,80	4185,84	3870,32
13 2,3-Диметилбутан	4185,28	3877,17	4186,93	3877,36	4188,60	3877,57	4193,63	3878,11
14 <i>n</i> -Гептан	4853,43	4501,30	4855,29	4501,49	4857,18	4501,72	4862,87	4502,28
15 <i>n</i> -Октан	5511,80	5115,66	5513,88	5115,87	5516,01	5116,11	5522,40	5116,73
16 <i>n</i> -Нонан	6171,15	5730,99	6173,46	5731,22	6175,82	5731,49	6182,91	5732,17
17 <i>n</i> -Декан	6829,77	6345,59	6832,31	6345,85	6834,90	6346,14	6842,69	6346,88
18 Этилен	1411,18	1323,15	1411,65	1323,20	1412,11	1323,24	1413,51	1323,36
19 Пропилен	2058,02	1925,97	2058,72	1926,05	2059,43	1926,13	2061,57	1926,35
20 1-Бутен	2716,82	2540,76	2717,75	2540,86	2718,70	2540,97	2721,55	2541,25
21 <i>цис</i> -2-Бутен	2710,0	2533,9	2711,0	2534,1	2711,9	2534,2	2714,9	2534,6
22 <i>транс</i> -2-Бутен	2706,4	2530,3	2707,4	2530,5	2708,3	2530,5	2711,1	2530,8
23 2-Метилпропен	700,2	2524,1	2701,1	2524,2	2702,0	2524,3	2704,8	2524,5
24 1-Пентен	3375,42	3155,34	3376,57	3155,45	3377,75	3155,59	3381,29	3155,92
25 Пропадиен	1943,11	1855,08	1943,53	1855,08	1943,96	1855,09	1945,25	1855,10
26 1,2-Бутадиен	2593,79	2461,74	2594,45	2461,78	2595,12	2461,82	2597,13	2461,91
27 1,3-Бутадиен	2540,77	2408,72	2541,43	2408,76	2542,10	2408,80	2544,13	2408,91
28 Ацетилен	1301,05	1257,03	1301,21	1256,98	1301,37	1256,94	1301,86	1256,79
29 Циклопентан	3319,59	3099,51	3320,88	3099,76	3322,19	3100,03	3326,14	3100,77
30 Метилциклопентан	3969,44	3705,34	3970,93	3705,59	3972,46	3705,86	3977,04	3706,60
31 Этилциклопентан	4628,47	4320,36	4630,19	4320,63	4631,95	4320,92	4637,27	4321,75
32 Циклогексан	3952,96	3688,86	3954,47	3689,13	3956,02	3689,42	3960,67	3690,23
33 Метилциклогексан	4600,64	4292,53	4602,35	4292,78	4604,09	4293,06	4609,34	4293,82
34 Этилциклогексан	5263,05	4910,92	5264,98	4911,19	5266,95	4911,49	5272,88	4912,29
35 Бензол	3301,43	3169,38	3302,15	3169,48	3302,86	3169,56	3305,03	3169,81
36 Толуол	3947,89	3771,83	3948,84	3771,95	3949,81	3772,08	3952,72	3772,42
37 Этилбензол	4607,15	4387,07	4608,32	4387,20	4609,53	4387,37	4613,14	4387,77
38 <i>о</i> -Ксилол	4596,31	4376,23	4597,46	4376,34	4598,64	4376,48	4602,17	4376,80
39 Метанол	764,09	676,06	764,59	676,14	765,09	676,22	766,59	676,44
40 Метантиол	1239,39	1151,36	1239,83	1151,39	1240,28	1151,41	1241,63	1151,48
41 Водород	285,83	241,81	285,99	241,76	286,15	241,72	286,63	241,56
42 Вода ¹⁾	44,016	0	44,224	0	44,433	0	45,074	0
43 Сульфид водорода	562,01	517,99	562,19	517,97	562,38	517,95	562,94	517,87
44 Аммиак	382,81	316,79	383,16	316,82	383,51	316,86	384,57	316,96
45 Цианид водорода	671,5	649,5	671,6	649,5	671,7	649,5	671,9	649,4
46 Моноксид углерода	282,98	282,98	282,95	282,95	282,91	282,91	282,80	282,80
47 Карбонил сульфид	548,23	548,23	548,19	548,19	548,15	548,15	548,01	548,01
48 Дисульфид углерода	1104,49	1104,49	1104,41	1104,41	1104,32	1104,32	1104,06	1104,06

¹⁾ Отличающееся от нуля значение теплоты сгорания паров воды формально выводится из определения значения высшей теплоты сгорания, которое требует конденсации в жидкое состояние всех паров воды в продуктах сгорания. Таким образом, любые пары воды, присутствующие в другом осушенном газе, дают вклад своей скрытой теплоты испарения в значение высшей теплоты сгорания смеси (более полное объяснение — см. приложение F).

Учебное издание
Кривцова Надежда Игоревна
Попок Евгений Владимирович

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ГАЗОВ МЕТОДОМ ХРОМАТОГРАФИИ

*Методические указания к выполнению лабораторных работ
по курсам «Технология подготовки нефти и газа» по направлению 18.04.01 Химическая
технология (Химическая технология топлива и газа)*

Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета
Подписано к печати . Формат 60х84/16. Бумага «Классика».
Печать RISO. Усл.печ.л. 20,0. Уч.-изд.л. 18,11.
Заказ . Тираж экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.