

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Институт Недропользования  
Кафедра промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности

Хамидуллина Е.А.

**Методические указания к освоению дисциплины  
«Химия взрывоопасных веществ и смесей»**

для магистрантов, обучающихся по направлению «Техносферная  
безопасность», магистерская программа «Пожарная безопасность»  
очной и заочной формы обучения

Иркутск

2015

**Целью** дисциплины является приобретение магистрантами знаний в области химии взрывоопасных веществ и смесей, необходимых для решения задач взрывотехнической экспертизы и безопасности производств.

**Основные задачи** изучения дисциплины:

- дать представление о химической структуре, составе, физико-химических свойствах взрывоопасных веществ и смесей;
- ознакомить с полным спектром типов взрывчатых веществ и смесей, их особенностями и назначением;
- научить использовать полученные знания при взрывотехнической экспертизе.

Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Магистрант в результате изучения дисциплины должен обладать следующими **основными компетенциями**:

- способностью самостоятельно получать знания, используя различные источники информации;
- способностью обобщать практические результаты работы и предлагать новые решения к резюмированию и аргументированному отстаиванию своих решений;
- способностью анализировать, оптимизировать и применять современные информационные технологии при решении научных задач;
- способностью применять на практике теории принятия управленческих решений и методы экспертных оценок.

Обучающийся после освоения настоящей дисциплины должен

*знать*: основы взрывных явлений; виды (типы) индивидуальных и смесевых взрывоопасных соединений промышленного и кустарного изготовления; физико-химические и взрывчатые свойства конденсированных ВВ; химические основы процесса нитрования; основы технологии ВВ;

*уметь*: применять полученные знания при производстве взрывотехнических экспертиз;

*владеть* навыками по определению свойств взрывчатых веществ и продуктов их разложения; оценки возможности получения взрывчатых веществ в не промышленных условиях; исследования возможности веществ взрываться и гореть в зависимости от внешних условий.

Дисциплина входит в обязательные дисциплины вариативной части учебного плана. Изучается в 1 семестре, аудиторные занятия – практические работы (24 ч – для очной формы обучения, 10 ч – для заочной формы обучения). Для магистрантов очной формы обучения лекции не предусмотрены, для заочной формы обучения – 2-х часовая установочная лекция.

Программа дисциплины предусматривает изучение следующих разделов:

№ раздела дисциплины	Содержание разделов
Тема 1	Классификация ВВ. Общее представление о свойствах ВВ. Условия перехода реакции во взрыв
Тема 2	Характеристики ВВ, выражающие их основные физико-химические свойства.
Тема 3	Химия и технология ароматических С-нитросоединений. Химия и технология ароматических N-нитросоединений. Химия и технология гетероциклических N-нитросоединений. Химия и технология нитратов спиртов.
Тема 4	Гремучая ртуть. Основные физико-химические и взрывчатые свойства гремучей ртути. Азид свинца. Основные физико-химические и взрывчатые свойства азид свинца. Тринитрорезорцинат свинца. Основные физико-химические и взрывчатые свойства ТНРС. Тетразен. Основные физико-химические и взрывчатые свойства тетразена.
Тема 5	Химия и технология нитратов целлюлозы. Свойства нитратов целлюлозы. Важнейшие марки нитрата целлюлозы, идущие на изготовления порохов. Технология получения нитрата целлюлозы. Производство порохов.
Тема 6	Пиротехнические составы (ПТС). Основные свойства ПТС. Основы технологии и оборудование пиротехнического производства.

**Контролируемыми элементами** содержания дисциплины (по разделам) являются следующие:

**Тема 1.** Магистранты должны *знать* следующие *термины и определения*: горение, взрыв, скорость реакции, константа скорости реакции, теплота образования, детонация, дефлаграция, взрывчатые вещества

*Знать* классификацию взрывчатых веществ, условия перехода реакции во взрыв, отличия горения от взрыва, признаки взрыва, закон Гесса.

*Литература для изучения темы 1:*

1. [1, 2] из списка основной литературы
2. [6, 7, 10, 11] из списка дополнительной литературы

При изучении темы 1 *следует обратить внимание* на реакции взрывчатого разложения твердых (конденсированных) взрывчатых веществ, для которых характерна *реакция взрывчатого разложения без участия кислорода*. Следует обратить внимание на *4 признака взрыва* (экзотермичность реакции, образование большого количества газов, высокая скорость протекания реакции, способность к самораспространению), отличающие взрыв от горения. При изучении классификации взрывчатых веществ, прежде всего, следует знать *классификацию по типу воздействия взрывчатых веществ* (инициирующие, бризантные, метательные) и понимать значение терминов «инициирующие», «бризантные», «метательные» взрывчатые вещества.

**Тема 2.** Магистранты должны *знать* содержание следующих *терминов и определений*: взрывной начальный импульс; факторы, влияющие на детонацию; характеристики, выражающие чувствительность к механическим воздействиям, к электрическим, к тепловым воздействиям. Физическая, химическая стабильность взрывчатых веществ (ВВ). Плотность ВВ. Температура вспышки ВВ. Водоустойчивость. Увлажняемость. Слеживаемость. Уплотняемость. Расслаивание. Летучесть. Пластичность. Текучесть. Старение ВВ.

*Уметь* записывать реакцию взрывного разложения, рассчитывать теплоту взрыва, количество газов, образующихся при взрыве (см. *расчетные задачи 1, 2*).

*Литература для изучения темы 2:*

1. [1, 2] из списка основной литературы
2. [5, 6, 7, 10, 11] из списка дополнительной литературы

При изучении темы 2 *следует обратить внимание* на параметры взрывчатых веществ, характеризующих способность к взрыву, на требования, предъявляемые к упаковке, условиям хранения, условиям обращения со взрывчатыми веществами. При изучении чувствительности к тепловым воздействиям следует знать *отличия термина «температура вспышки»* для ЛВЖ, горючих жидкостей и конденсированных взрывчатых веществ. Следует разобраться со значением понятий «чувствительность к механическим воздействиям» - нормирование способа определения, единицы измерения этого параметра; «расширение в бомбе Трауцля», «бризантность на свинцовых цилиндрах» - смысл этих терминов по отношению к способности взрывчатых веществ взрываться.

**Тема 3.** Магистранты должны *знать* следующие *термины и определения*: бризантные взрывчатые вещества, кислородный баланс, бризантность, фугасность

*Знать* примеры взрывчатых веществ ароматических и алифатических С-нитросоединений, ароматических и гетероциклических нитроаминов, нитратов спиртов, их строение, физические и химические свойства, характеристики, выражающие их взрывчатые свойства, взрывчатые смеси на их основе. Технологию получения нитросоединений. Области применения бризантных ВВ.

*Уметь* рассчитывать температуру взрыва (см. *расчетная задача 3*).

*Литература для изучения темы 3:*

1. [3] из списка основной литературы
2. [5, 7] из списка дополнительной литературы

При изучении темы 3 *следует обратить внимание* на отличия взрывчатых свойств нитросоединений в зависимости от химического строения (С-нитросоединения, N- нитросоединения, O-нитросоединения). Следует обратить внимание на строение, физические, химические и взрывчатые свойства важнейших представителей каждого класса химических соединений, образующих бризантные взрывчатые вещества.

**Тема 4.** Магистранты должны *знать* следующие *термины и определения*: инициирующие взрывчатые вещества, инициирующая способность, ускорение взрывчатого разложения, эндотермические вещества.

*Знать* требования к инициирующим ВВ, особенности и свойства азидов свинца, гремучей ртути, тринитротетразолатов свинца, тетразенов, органических перекисей, области применения инициирующих ВВ.

*Уметь* рассчитывать кислородный баланс взрывчатого вещества, определять продукты взрыва для ВВ с положительным, нулевым, отрицательным кислородным балансом (см. *расчетные задачи 4, 5*).

При решении задач *следует* пользоваться данными табл. 4 Приложения.

*Литература для изучения темы 4:*

1. [1, 2] из списка основной литературы
2. [4, 5, 9] из списка дополнительной литературы

При изучении темы 4 *следует обратить внимание* на параметры взрывчатых веществ, придающие им свойства инициирующего взрывчатого

вещества. При решении задач на определение продуктов взрыва следует всегда предварительно рассчитывать кислородный баланс взрывчатого вещества. *Константы равновесия газовых реакций* следует брать из табл. 4 Приложения, при этом следует предварительно проанализировать возможный состав газовой смеси в продуктах реакции и возможность протекания химических превращений между продуктами взрыва.

**Тема 5.** Магистранты должны *знать* следующие *термины и определения*: метательные взрывчатые вещества, пороха, черный порох

*Знать* требования к метательным ВВ, взрывчатые свойства нитратов целлюлозы, механизм получения нитратов целлюлозы, свойства порохов.

*Уметь* рассчитывать давление взрыва и безопасные расстояния при взрыве.

*Литература для изучения темы 5:*

1. [1, 2] из списка основной литературы
2. [5, 11] из списка дополнительной литературы

При изучении темы 5 *следует обратить внимание* на состав, строение и свойства взрывчатых смесей, используемых как метательные взрывчатые вещества. При решении задач на расчет давления взрыва и определение безопасных расстояний следует пользоваться учебным пособием Тимофеева С.С., Хамидуллина Е.А. Основы теории риска. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012, 128 с. (раздел «Оценка аварийных рисков»).

**Тема 6.** Магистранты должны *знать* следующие *термины и определения*: пиротехнические составы (ПТС). Основные свойства ПТС. Основы технологии и оборудование пиротехнического производства.

*Литература для изучения темы 6:*

1. [1, 2] из списка основной литературы
2. [5, 7, 8] из списка дополнительной литературы

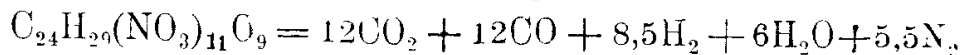
## Примеры решения задач.

### Расчетная задача 1.

Расчет объема газов, образующихся при взрыве.

Основанием для теоретического вычисления объема газов служит закон Авогадро, по которому: «в равных объемах газов при одинаковых условиях давления и температуры содержится одинаковое количество частиц или молекул» и что объем одной граммолекулы газа при 0° и 760 мм давления равняется 22,4 л.

Рассмотрим это на примере. Нам нужно определить объем газов, выделяющихся при взрывчатом разложении пироксилина. Пироксилин при высоких плотностях заряжания разлагается:



Считаем число граммолекул вместе с водяными парами:  $12 + 12 + 8,5 + 5,5 + 6 = 44$ , и без них, в случае присутствия воды в жидком состоянии:  $12 + 12 + 8,5 + 5,5 = 38$ .

На основании этого вычисляются объемы газообразных продуктов взрыва для 1 кг взрывчатого вещества по следующей формуле:

$$V_0 = 1000 \cdot 22 \cdot 4 \cdot N \text{ литров}$$

где 22,4 будет объем 1 граммолекулы при 0° и 760 мм давления;

$N$  — количество выделенных молекул газов;

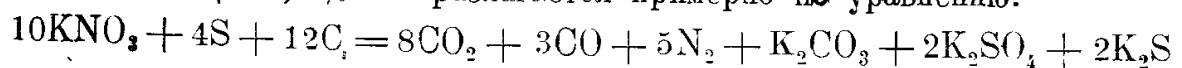
$M$  — молекулярный вес разлагаемого вещества.

Прилагая это к нашему частному случаю с пироксилином, получим:

$$\frac{1000 \cdot 22 \cdot 4 \cdot 44}{1143} = 859 \text{ л при воде парообразной и}$$

$$\frac{1000 \cdot 22 \cdot 4 \cdot 38}{1143} = 725 \text{ при воде жидкой.}$$

Возьмем еще пример: черный дымный порох состава 78,9%  $\text{KNO}_3$  + 9,9%  $\text{S}$  + 11,2%  $\text{C}$  разлагается примерно по уравнению:



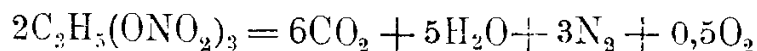
Число граммолекул газов равняется  $8 + 3 + 5 = 16$ , откуда следовательно на 1 кг пороха будет:

$$\frac{1000 \cdot 22 \cdot 4 \cdot 16}{1282} = 279 \text{ л}$$

## Расчетная задача 2.

Расчет теплоты взрывчатого разложения.

Нитроглицерин разлагается по уравнению:

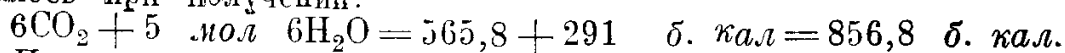


Из термохимических таблиц находим образования теплоты, углекислоты и воды.

Теплота образования одной молекулы углекислого газа = 94,3 б. кал, а у нас образовалось шесть молекул  $CO_2$ , следовательно общая теплота образования углекислоты будет  $94,3 \times 6 = 565,8$  б. кал.

Теплота образования одной молекулы воды (в газообразном состоянии) равна 58,2 б. кал, следовательно общая теплота образования воды будет  $58,2 \times 5 = 291$  б. кал. Теплоты образования у элементов азота и кислорода конечно быть не может.

Таким образом мы можем узнать то количество тепла, которое образовалось при получении:



При этом нам необходимо учесть количество теплоты, затраченное нами на разложение двух грамммолекул нитроглицерина. На разложение одной грамммолекулы мы затрачиваем 94,2 б. кал, а на две — 188,4 б. кал.

Следовательно из разницы найдем теплоту, идущую на совершение работы:  $856,8 - 188,4 = 668,4$  б. кал, получившихся при разложении двух грамммолекул нитроглицерина. Отсюда теплота взрывчатого разложения 1 кг нитроглицерина находится равной:

$$\frac{668,4 \cdot 1000}{454} = 1472 \text{ кал}$$

вес 1 грамммолекулы нитроглицерина равен 227 г.

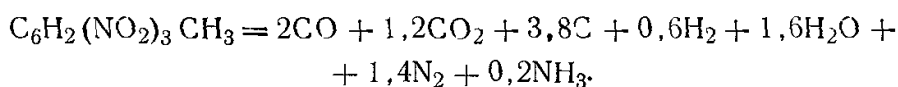
Этим способом мы можем пользоваться лишь в том случае, когда знаем формулу химического разложения. В противном случае определение приходится вести только экспериментальным путем.

При решении задачи следует воспользоваться табл. 1.1 и 1.2 Приложения.

### Расчетная задача 3.

Расчет температуры взрыва.

**Пример.** Вычислить температуру взрыва тротила, принимая следующее уравнение взрывного превращения:



Пользуясь термохимическими таблицами Льюиса и Эльбе, найдем теплоту образования продуктов взрыва (коэффициент пересчета в систему СИ 1 ккал=4,19 кДж).

		кДж	ккал
2 CO	2 · 26,88	225,25	53,76
1,2 CO <sub>2</sub>	1,2 · 94,5	475,15	113,40
1,6 H <sub>2</sub> O	1,6 · 57,78	387,36	92,45
0,2 NH <sub>3</sub>	0,2 · 11	9,22	2,2
Сумма теплот образования продуктов взрыва		1096,9~1097	261,8

	кДж/моль	ккал/моль
Теплота образования тротила	43,32	17,5
Теплота взрыва тротила	1023,6	244,3

Задавшись температурой взрыва 3200 К, подсчитаем изменение внутренней энергии продуктов взрыва от 291 К до 3200 К.

		кДж	ккал
2 CO	2 · 18,41	154,27	36,82
1,2 CO <sub>2</sub>	1,2 · 34,0	170,95	40,80
3,8 C	3,8 · 14,79	235,48	56,20
0,6 H <sub>2</sub>	0,6 · 17,20	43,24	10,32
1,6 H <sub>2</sub> O	1,6 · 26,65	178,66	42,64
1,4 N <sub>2</sub>	1,4 · 18,22	106,89	25,51
0,2 NH <sub>3</sub>	0,2 · 39,45	33,06	7,89
Изменение внутренней энергии от 291 К до 3200 К		922,55 кДж/моль	220,2 ккал/моль

Разность теплоты взрыва и внутренней энергии составит  
244,3—220,2=24,1 ккал/моль (100,98 кДж/моль).

Изменение внутренней энергии значительно меньше теплоты взрыва. Поэтому определим изменение внутренней энергии продуктов взрыва для ближайшей температуры 3400 К.

		кДж	ккал
2 CO	2 · 19,8	165,92	39,60
1,2 CO <sub>2</sub>	1,2 · 36,64	184,23	48,97
3,8 C	3,8 · 14,79	235,48	56,20
0,6 H <sub>2</sub>	0,6 · 18,59	46,2	11,15
1,6 H <sub>2</sub> O	1,6 · 28,87	67,88	46,20
1,4 N <sub>2</sub>	1,4 · 19,60	114,94	27,44
0,2 NH <sub>3</sub>	0,2 · 42,82	35,87	8,56
Сумма теплот образования продуктов взрыва		976,7	233,12

Изменение внутренней энергии меньше теплоты взрыва:

$$244,3 - 233,12 = 11,18 \text{ ккал/моль (46,72 кДж/моль)}.$$

Принимая приближению, что при малых изменениях температуры приращение внутренней энергии прямо пропорционально изменению температуры, найдем, что одной килокалории соответствует изменение температуры на

$$\frac{200^\circ}{233,12 - 220,2} = \frac{200^\circ}{12,92} = 15,5^\circ.$$

Следовательно, 11,18 ккал/моль соответствует изменению температуры на  $11,18 \cdot 15,5 = 173,3 \sim 173^\circ$ . Искомая температура равна  $3400 \text{ К} + 173 \text{ К} = 3573 \text{ К}$

Для решения этой задачи следует воспользоваться данными табл. 3.

#### Расчетная задача 4.

Расчет кислородного баланса взрывчатого вещества.

*Кислородный баланс взрывчатого вещества (К.б.)* – это отношение количества кислорода, содержащегося во взрывчатом веществе к его количеству, необходимому для полного окисления всех компонентов этого взрывчатого вещества.

$$\text{К. б.} = \frac{d - (2a + b/2)}{M} \cdot 16 \cdot 100\%,$$

где  $d$  – количество атомов O;

$a$  – количество атомов C;

$b$  – количество атомов H.

Если кислородный баланс *отрицательный*, то кислорода недостаточно для полного окисления всех элементов.

Если кислородный баланс *положительный*, то кислорода больше, чем необходимо для окисления горючих элементов (при взрывном превращении образуются ядовитые окислы азота, вследствие чего такие взрывчатые вещества не допускаются для взрывных работ над землей).

Кислородный баланс тротила  $\text{C}_7\text{H}_5(\text{NO}_2)_3$ :

$$\text{К. б.} = \frac{6 - (14 + 2,5)}{227} \cdot 16 \cdot 100\% = -74\%.$$

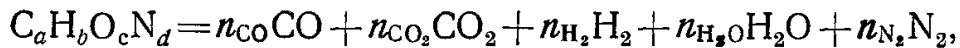
Кислородный баланс аммиачной селитры  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ :

$$\text{К. б.} = \frac{3 - 2}{80} \cdot 16 \cdot 100\% = +20\%.$$

## Расчетная задача 5.

Написать уравнение взрывчатого разложения ВВ.

3. Уравнение реакции разложения ВВ с отрицательным кислородным балансом — содержания кислорода достаточно для превращения всего углерода в газы. В продуктах разложения, кроме  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$ , появляются  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ . В общем случае уравнение реакции может быть представлено в следующем виде:

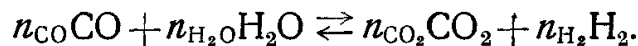


где индексы  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  обозначают число атомов соответствующего элемента в молекуле ВВ;  $n_{\text{CO}}$ ,  $n_{\text{CO}_2}$ , ... — число молей соответствующих компонентов продуктов взрывного превращения.

Очевидно, что

$$n_{\text{CO}} + n_{\text{CO}_2} = a, \quad 2n_{\text{H}_2} + 2n_{\text{H}_2\text{O}} = b, \quad n_{\text{CO}} + 2n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} = c, \quad 2n_{\text{N}_2} = d.$$

Между продуктами разложения идет обратимая реакция (так называемая реакция водяного газа):



Выражая концентрации компонентов водяного газа через искомые величины ( $n_{\text{CO}}$ ,  $n_{\text{CO}_2}$ ,  $n_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $n_{\text{H}_2}$ ), согласно учению о химическом равновесии получим

$$\frac{n_{\text{CO}} \cdot n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{CO}_2} \cdot n_{\text{H}_2}} = K_1,$$

где  $K_1$  — константа равновесия реакции водяного газа. Напомним, что константы равновесия могут быть выражены через равновесные концентрации реагирующих веществ (обозначаются  $K_c$ ) или через их равновесные парциальные давления (обозначаются  $K_p$ ). Здесь принят второй из указанных способов. Если считать продукты взрывного превращения идеальным газом, то для реакции  $aA + bB \rightleftharpoons cC + dD$  легко вывести

$$K_p = \frac{p_A^a \cdot p_B^b}{p_C^c \cdot p_D^d} = \frac{n_A^a \cdot n_B^b}{n_C^c \cdot n_D^d} \left( \frac{p}{n_{\Sigma}} \right)^{\Delta n} = \frac{n_A^a \cdot n_B^b}{n_C^c \cdot n_D^d} \left( \frac{RT}{v} \right)^{\Delta n},$$

где  $p$  — общее давление продуктов взрыва;  $n_{\Sigma}$ ,  $v$  и  $T$  — соответственно общее число молей, объем и температура этих продуктов, а  $\Delta n = (a + b) - (c + d)$ .

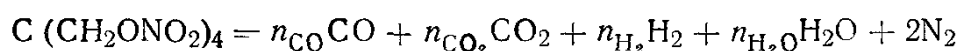
Константа равновесия для данной реакции зависит только от температуры. Аналитическое выражение этой зависимости сложно. При расчетах пользуются значениями констант, помещенными в соответствующих таблицах. Для определения константы

равновесия по таблице надо знать температуру взрывного превращения; с другой стороны, чтобы вычислить температуру, нужно знать состав продуктов взрыва. Этот круг разрешается тем, что сначала задаются ориентировочным значением температуры  $T$ , определяют величину  $K_1$  при этой температуре и решают уравнения. Определив значения  $n_{\text{CO}_2}$ ,  $n_{\text{CO}}$ ,  $n_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $n_{\text{N}_2}$  и  $n_{\text{H}_2}$ , вычисляют температуру взрыва (см. § 2 гл. IV).

Если полученная температура отличается от первоначально принятого значения больше чем на  $50^\circ$ , то по расчетной температуре находят новую константу равновесия; далее повторяют расчет до получения удовлетворительного сближения между двумя температурами.

Для точных расчетов, помимо реакции водяного газа, учитывают и другие возможные реакции между продуктами разложения, а также диссоциацию последних.

**Пример.** Составить уравнение реакции разложения тэна:



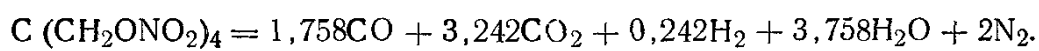
Температура разложения тэна 4000 К. При этой температуре константа равновесия реакции водяного газа равна 8,418. Имеем следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} n_{\text{CO}} + n_{\text{CO}_2} &= 5; & 2n_{\text{H}_2} + 2n_{\text{H}_2\text{O}} &= 8; \\ n_{\text{CO}} + 2n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} &= 12; & \frac{n_{\text{CO}} \cdot n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{CO}_2} \cdot n_{\text{H}_2}} &= 8,418. \end{aligned}$$

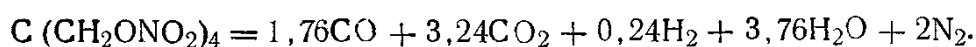
Решая эти уравнения, находим

$$n_{\text{CO}} = 1,758; \quad n_{\text{CO}_2} = 3,242; \quad n_{\text{H}_2} = 0,242; \quad n_{\text{H}_2\text{O}} = 3,758.$$

Искомое уравнение разложения примет вид

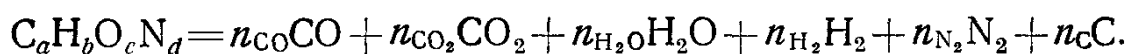


Температура взрыва, подсчитанная на основе этого уравнения, равна 4304 К; константа равновесия при этой температуре равна 8,531. Вновь решаем четыре уравнения при новом значении константы. Находим новое уравнение реакции разложения тэна:

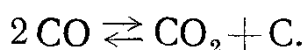


Температура взрыва, подсчитанная для этого уравнения, равна 4303 К. Сближение удовлетворительное.

**4. Уравнение реакции разложения ВВ с отрицательным кислородным балансом — содержания кислорода недостаточно для окисления всего углерода в СО (в продуктах взрыва остается свободный углерод)** Уравнение реакции разложения, в общем виде может быть записано следующим образом:



В этом случае, кроме реакции водяного газа, может протекать еще так называемая реакция доменного газа



Для определения неизвестных коэффициентов имеем аналогично предыдущему следующие уравнения:

$$\begin{aligned} n_{\text{CO}} + n_{\text{CO}_2} + n_{\text{C}} &= a, & n_{\text{CO}} + 2n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} &= c, \\ 2n_{\text{H}_2} + 2n_{\text{H}_2\text{O}} &= b, & \frac{n_{\text{CO}} \cdot n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{CO}_2} \cdot n_{\text{H}_2}} &= K_1, \\ 2n_{\text{N}_2} &= d, \end{aligned}$$

Из выражения константы равновесия для реакции доменного газа получим

$$\frac{n_{\text{CO}}^2}{n_{\text{CO}_2}} \frac{p}{n_{\text{H}_2}} = \frac{n_{\text{CO}}^2}{n_{\text{CO}_2}} \frac{RT}{V} = K_2,$$

где  $R$  — газовая постоянная;  $T$  — температура продуктов взрыва;  $V$  — объем, занимаемый продуктами взрыва.

Поскольку при решении этой системы уравнений температура неизвестна, то, задаваясь ориентировочно ее значением, решаем задачу методом последовательных приближений.

Вычисления коэффициентов уравнений реакции горения порохов ведут на вычислительных машинах или упрощенным методом.

### Уравнение реакции разложения ВВ с нулевым или положительным кислородным балансом.

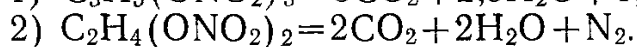
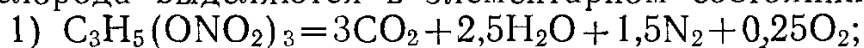
Возможны различные реакции взаимодействия между углеродом, водородом, кислородом и азотом, содержащимися во взрывчатом веществе. Наиболее важные из них приведены в таблице ниже:

Тепловые эффекты важнейших реакций между углеродом, водородом, азотом и кислородом

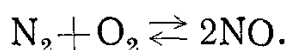
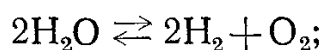
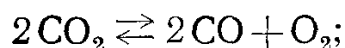
Реакция	Тепловой эффект		Реакция	Тепловой эффект	
	ккал	кДж		ккал	кДж
$2\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}$	+52,8	+221,67	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$	-3,5	-14,7
$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	+94,5	+396,90		+18,4	+77,28
$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}(\text{пар})$	+115,4	+484,68	$\text{C} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4$	+18,4	+77,28
$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$	+9,8	+41,16	$\text{H}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2$	-57,1	-239,82
$2\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{C}$	+21,6	+90,72	$2\text{C} + \text{N}_2 + \text{H}_2 \rightarrow 2\text{HCN}$	-65,8	-276,36
$2\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$	+59,1	+248,22	$\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$	+21,0	+88,20
$\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}(\text{пар})$	+57,8	+242,76	$\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}$	-43,2	-181,44
$2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$	+41,2	+173,04	$2\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{N}_2\text{O}$	-35,4	-148,08
			$\text{N}_2 + 2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}_2$	-8,2	-34,44

При теоретическом расчете уравнения реакции разложения взрывчатых веществ допускаем, что при высокой температуре взрыва успевает установиться термодинамическое равновесие. Кроме того, опыт показывает, что для такой системы с положительным кислородным балансом в первом приближении можно учесть известный принцип наибольшей работы (Бертло).

Из табл. 11 видно, что при взаимодействии между углеродом, водородом, кислородом и азотом наибольшее количество теплоты выделяется в случае сгорания углерода в углекислоту и водорода в воду. Следовательно, при взрывном превращении ВВ с положительным или нулевым кислородным балансом можно в первом приближении принять простое правило: весь углерод окисляется в углекислоту и водород в воду, а азот и избыток кислорода выделяются в элементарном состоянии. Например,



Между продуктами взрыва могут происходить некоторые вторичные реакции, например,



Однако содержание CO, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO и других второстепенных компонентов в продуктах взрыва незначительно, и во многих случаях эти реакции можно не учитывать. Необходимо их учитывать в случае ведения взрывных работ в шахтах, и вообще, в закрытых помещениях.

Таблица – Зависимость константы равновесия реакции водяного газа от температуры

<i>t</i> , К	600	800	1000	1200	1400	1600	1800
<i>K<sub>p</sub></i>	0,04	0,24	0,71	1,40	2,19	3,06	3,80
<i>t</i> , К	2000	2200	2400	2600	2800	3000	
<i>K<sub>p</sub></i>	4,55	5,21	5,78	6,22	6,59	6,90	

## **Литература для подготовки**

### **а) основная литература**

1. Латышев О.Г. Промышленные взрывчатые материалы. Учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. Гос.горн. ун-та, 2009. 220 с.
2. Драбчук Ю.В. Технология и безопасность взрывных работ. Учебное пособие для вузов. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008.
3. Орлова Е.Ю. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ: учебник для вузов. – Л.: Химия, 1981. – 312 с.

### **б) дополнительная литература**

4. Багал Л.И. Химия и технология инициирующих взрывчатых веществ. М.: Машиностроение, 1975, 456 с.
5. Горст А.Г. Пороха и взрывчатые вещества. М.: Машиностроение, 1972, 208 с.
6. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980, 478 с.
7. Яхонтов А.Д. Курс взрывчатых веществ. М.: Госгориздат, 1933, 102 с.
8. Пиротехнические составы цветных огней. Составитель Мадякин Ф.П. Казань: Казанский химико-технологический институт, 1978, 90 с.
9. Карножицкий В. Органические перекиси. М.: Изд-во иностранной литературы, 1961, 145 с.
10. Митрофанов В.В. Детонация гомогенных и гетерогенных систем. Новосибирск: Изд-во института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, 2003, 200 с.
11. Нишпал Г.А. и др. Теория и практика взрывобезопасности энергоемких материалов. М.: ЦЭИ «Химмаш», 2002, 140 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

**Таблица 1.1. Теплоты образования некоторых веществ из элементов в стандартных состояниях \***

Вещество	— $\Delta H_f^\circ$ , ккал/моль	Вещество	— $\Delta H_f^\circ$ , ккал/моль
Атом кислорода O (г)	59,5	Окись азота NO (г)	21,6
Молекула кислорода O <sub>2</sub> (г)	0	Двуокись азота NO <sub>2</sub> (г)	8,0
Озон O <sub>3</sub> (г)	34,0	Другие окислы азота (г)	
Атом водорода H (г)	52,1	N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,9
Молекула водорода H <sub>2</sub> (г)	0	N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	2,2
Вода		N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	—10,2
H <sub>2</sub> O (г)	—57,8	Закись азота N <sub>2</sub> O (г)	19,5
H <sub>2</sub> O (ж)	—68,3	NH (г)	81,2
Радикал    HO <sub>2</sub> (г)	3,9	NH <sub>2</sub> (г)	42,3
Перекись водорода H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (ж)	—44,7	Аммиак NH <sub>3</sub> (г)	—11,0
Гидроксил OH (г)	9,3	Гидразин N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (ж)	12,1
Атом хлора Cl (г)	28,9	Углерод C	
Молекула хлора Cl <sub>2</sub> (г)	0	графит	0
Окислы хлора (г)		алмаз	0,4
ClO	24,2	C (г)	171,0
ClO <sub>2</sub>	25,0	C <sub>2</sub> (г)	198
Cl <sub>2</sub> O	18,1	Окись углерода CO (г)	—26,4
Хлорноватистая кислота HOCl (г)	—21,5	Углекислый газ CO <sub>2</sub> (г)	—94,0
Фтористый водород HF (г)	—64,2	HCO (г)	—5,3
Хлористый водород HCl (г)	—22,1	CH (г)	142,0
Бромистый водород HBr (г)	—8,7	CH <sub>2</sub> (г)	65,8
Атом серы S (г)	65,0	Метил CH <sub>3</sub> (г)	33,0
Окислы серы (г)		Метан CH <sub>4</sub> (г)	—17,9
SO <sub>2</sub>	97,0	Этан C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (г)	—20,2
SO <sub>2</sub>	—71,0	Пропан C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (г)	—24,8
SO <sub>3</sub>	—94,4	Этилен C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (г)	12,6
S <sub>2</sub> O	—26,1	Ацетилен C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (г)	54,2
SH	35,0	CS (г)	52,3
Сероводород H <sub>2</sub> S (г)	—4,9	Сероуглерод CS <sub>2</sub> (ж)	21,2
Атом азота N (г)	113,0	COS (г)	—33,9
Молекула азота N <sub>2</sub> (г)	0	CN (г)	88,8
		HCN (г)	30,5

\* В таблице введены обозначения: (г) — газ, (ж) — жидкость.

Таблица 1.2. Энергия разрыва связей

Реакция	Энергия связи, ккал/моль	Реакция	Энергия связи, ккал/моль
$\text{Cl}_2 \rightarrow 2\text{Cl}$	58,0	$\text{SO}_3 \rightarrow \text{SO}_2 + \text{O}$	83,2
$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}$	103,3	$\text{C}_2 \rightarrow 2\text{C}$	144,6
$\text{HCl} \rightarrow \text{H} + \text{Cl}$	103,1	$\text{C}\equiv\text{CH} \rightarrow \text{C} + \text{CH}$	191,0
$\text{HO} \rightarrow \text{H} + \text{O}$	110,0	$\text{HC}\equiv\text{CH} \rightarrow 2\text{CH}$	230,0
$\text{H}_2\dot{\text{O}} \rightarrow \text{OH} + \text{H}$	119,2	$\text{H}_2\text{C}=\text{CH} \rightarrow \text{CH}_2 + \text{CH}$	170,3
$\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{OH}$	56,0	$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2 \rightarrow 2\text{CH}_2$	170,2
$\text{HS} \rightarrow \text{S} + \text{H}$	83,4	$\text{CH} \rightarrow \text{C} + \text{H}$	81,0
$\text{N}_2 \rightarrow 2\text{N}$	225,9	$\text{HCO} \rightarrow \text{CO} + \text{H}$	18,5
$\text{NH} \rightarrow \text{N} + \text{H}$	74,9	$\text{HCN} \rightarrow \text{H} + \text{CN}$	122,0
$\text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_2 + \text{H}$	104,7	$\text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3 + \text{H}$	104,0
$\text{NO} \rightarrow \text{N} + \text{O}$	150,9	$\text{HC}\equiv\text{CH} \rightarrow \text{C}_2\text{H} + \text{H}$	120,0
$\text{NO}_2 \rightarrow \text{N} + \text{O}_2$	105,0	$\text{C}_2\text{H}_6 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5 + \text{H}$	98,0
$\text{NO}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{O}$	73,1	$\text{CO} \rightarrow \text{C} + \text{O}$	257,2
$\text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{N}$	40,0	$\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{O}$	127,2
$\text{O}_2 \rightarrow 2\text{O}$	118,0	$\text{HCO} \rightarrow \text{CH} + \text{O}$	194,3
$\text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}$	25,6	$\text{CN} \rightarrow \text{C} + \text{N}$	181,9
$\text{S}_2 \rightarrow 2\text{S}$	101,7	$\text{HCN} \rightarrow \text{CH} + \text{N}$	223,0
$\text{SO} \rightarrow \text{S} + \text{O}$	124,7	$\text{CS} \rightarrow \text{C} + \text{S}$	170,6
$\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO} + \text{O}$	131,6	$\text{CS}_2 \rightarrow \text{CS} + \text{S}$	105,4

Внутренняя энергия газов  $E_T^0 - E_0^0$ , кал/моль

T, °K	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	NO	OH	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
300	1440	1486	1489	1489	1611	1523	1658	1786
400	1936	1998	1988	1989	2126	2035	2400	2399
500	2436	2530	2491	2496	2650	2541	3229	3032
600	2937	3087	3006	3017	3189	3049	4130	3690
700	3441	3667	3534	3555	3846	3556	5090	4381
800	3948	4266	4079	4110	4320	4069	6100	5100
900	4460	4881	4640	4683	4912	4589	7150	5846
1000	4979	5510	5215	5270	5519	5173	8235	6621
1200	6043	6799	6408	6483	6768	6209	10489	8245
1400	7147	8123	7643	7739	8057	7346	12829	9971
1600	8291	9475	8911	9023	9374	8522	15220	11786
1800	9476	10884	10206	10333	10706	9738	17683	13687
2000	10697	12244	11520	11662	12056	10986	20166	15656
2200	11950	13664	12851	13004	13417	12262	22688	17681
2400	13232	15105	14195	14359	14791	13565	25231	19752
2600	14540	16565	15549	15722	16174	14890	27798	21860
2800	15872	18049	16913	17093	17566	16235	30382	23999
3000	17224	19553	18283	18473	18962	17597	32978	26198
3200	18595	21073	19661	19858	20364	18974	35594	28387
3400	19981	22611	21047	21248	21769	20368	38237	30600
3600	21382	24166	22437	22643	23179	21776	40890	32846
3800	22797	25736	23831	24043	24599	23197	43543	35119
4000	24223	27315	25227	25447	26023	24627	46211	37411
4200	25662	28911	26631	26852	27453	26075	48892	39691
4400	27109	30519	28039	28262	28889	27531	51587	41975
4600	28568	32138	29451	29678	30333	29001	54283	44269
4800	30035	33759	30862	31101	31784	30486	56975	46571
5000	31513	35384	32284	32415	33244	31974	59714	48914

T, °K	C (графит) *	CN	C <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	CF <sub>4</sub>	F <sub>2</sub>	HF	S <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
300	255	1494	2460	2474	1530	1470	1560	2155
400	503	1994	3320	3882	2110	1968	2155	2735
600	1198	3030	6400	7340	3335	2965	3430	4555
800	2082	4152	9400	11300	4660	3970	4680	6570
1000	3075	5306	12570	15520	6020	5000	6120	8710
1200	4130	6534	15900	19900	7400	6060	7500	10930
1400	5242	7804	19310	24400	8810	7170	8880	13180
1600	6400	9109	22780	29000	10250	8310	10270	15440
1800	7580	10453	26350	33600	11690	9490	11700	17760
2000	8780	11834	29920	38200	13120	10700	13080	20100
2500	11850	15466	39000	49900	16800	13870	16600	25943
3000	15030	19364	48200	61700	20520	17150	20160	31829
3500	18270	23502	57500	73450	24300	20580	23720	37735
4000	21600	27820	66700	85400	28100	24050	27310	43662
4500	25000	32253	76000	—	32000	27620	30900	—
5000	28300	36750	85400	—	35950	31250	34550	—

<sup>1)</sup> Обозначения, используемые в таблицах, объяснены в гл. 11.

\*  $H_T^0 - E_0^0$ .

## Продолжение таблицы 3

Продолжение табл. А.1

$T, ^\circ\text{K}$	Метан $\text{CH}_4$	Этан $\text{C}_2\text{H}_6$	Этилен $\text{C}_2\text{H}_4$	Ацетилен $\text{C}_2\text{H}_2$	Пропан $\text{C}_3\text{H}_8$	Бензол $\text{C}_6\text{H}_6$	$\text{NH}_3$	$\text{HCN}$
300	1817	2283	1948	1815	2950	2841	1823	1629
400	2528	3501	2916	2746	4761	4967	2505	2333
500	3371	5016	4123	3797	7046	7756	3260	3106
600	4357	6824	5540	4935	9738	11093	4070	3933
700	5480	8889	7136	6142	12799	14876	5000	4809
800	6731	11170	8890	7409	16170	19022	5980	5726
900	8099	13652	10772	8732	19812	23472	7020	6682
1000	9573	16293	12773	10103	23683	28176	8140	7672
1100	11134	19104	14884	11520	27764	33094	9320	8690
1200	12785	22035	17085	12977	32035	38205	10520	9737
1300	14516	25097	19367	14472	36447	43457	11790	10811
1400	16308	28258	21708	16000	40998	48858	13110	11909
1500	18149	31519	24119	17560	45669	54369	14470	13028
$T, ^\circ\text{K}$	$\text{O}_3$	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{Cl}_2$	$\text{Br}_2$	$\text{I}_2$	$\text{HCl}$	$\text{HBr}$	$\text{HI}$
300	1950	1712	1613	1744	1838	1482	1483	1486
400	1950	2492	2244	2416	2526	1979	1982	1985
500	3660	3377	2898	3099	3219	2479	2484	2492
600	4627	4296	3569	3789	3917	2984	2994	3011
700	5644	5293	4249	4483	4617	3497	3155	3547
800	6702	6339	4935	5180	5320	4021	4052	4099
900	7793	7428	5626	5880	6024	4558	4602	4669
1000	8909	8553	6322	6581	6731	5108	5169	5255
1100	—	9708	7021	7284	7438	5671	5749	5855
1200	—	10889	7723	7988	8147	6248	6343	6468
1300	—	12160	8427	8695	8838	6838	6950	7093
1400	—	13312	9132	9402	9572	7438	7565	7728
1500	—	—	9841	10111	10285	8169	8193	8371

Таблица 4 - Константы равновесия реакций в зависимости от температуры

Таблица А.2

Константы равновесия  $K_p$  различных реакций; энергии реакций при абсолютном нуле температуры  $\Delta E_0^\circ$ , ккал/моль\*

Температура, °К	Константы равновесия $K_p$ различных реакций; энергии реакций при абсолютном нуле температуры $\Delta E_0^\circ$ , ккал/моль*										
	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	$\text{NO} \rightleftharpoons \frac{1}{2}\text{O}_2 + \frac{1}{2}\text{N}_2$ + 21,477	$2\text{N} \rightleftharpoons \text{N}_2$ + 225,100	$\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}(\text{газ})$ + 45,892	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O}(\text{газ}) \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$ + 9,660	$\text{CO} \rightleftharpoons \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{C}(\text{графит})$ + 66,767	$\text{C}(\text{графит}) \rightleftharpoons \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}$ + 27,202	$\text{C}(\text{газ}) \rightleftharpoons \text{C}(\text{графит})$ + 170,390	$\text{OH} \rightleftharpoons \frac{1}{2}\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}$ + 67,107	$\text{H}_2 \rightleftharpoons \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}$ + 57,107	$2\text{O} \rightleftharpoons \text{O}_2$ + 117,172	$2\text{H} \rightleftharpoons \text{H}_2$ + 103,240
300	-15,090	-158,66	-24,68	-4,95	-44,74	-23,93	-117,12	-46,29	-39,79	-80,90	-70,74
400	-11,156	-117,47	-15,60	-3,17	-32,41	-19,13	-85,83	-33,91	-29,24	-58,51	-51,74
600	-7,219	-76,21	-6,296	-1,44	-20,07	-14,34	-54,49	-21,47	-18,63	-36,86	-32,63
800	-5,250	-55,52	-1,507	-0,61	-13,90	-11,93	-38,80	-15,22	-13,29	-25,99	-23,07
1000	-4,068	-43,08	+1,425	-0,139	-10,199	-10,48	-29,38	-11,444	-10,060	-19,440	-17,288
1200	-3,279	-34,62	+3,395	+0,154	-7,742	-9,498	-23,10	-8,922	-7,896	-15,062	-13,410
1400	-2,717	-28,83	+4,810	+0,352	-5,992	-8,790	-18,62	-7,116	-6,344	-11,932	-10,627
1600	-2,294	-24,37	+5,873	+0,490	-4,684	-8,254	-15,26	-5,758	-5,175	-9,575	-8,530
1800	-1,966	-20,89	+6,70**	+0,591	-3,672	-7,829	-12,64	-4,700	-4,263	-7,740	-6,893
2000	-1,703	-18,11	+7,35**	+0,668	-2,863	-7,486	-10,567	-3,852	-3,531	-6,269	-5,579
2200	-1,488	-15,82	+7,89**	+0,725	-2,206	-7,201	-8,864	-3,158	-2,931	-5,064	-4,500
2400	-1,309	-13,92	+8,32**	+0,767	-1,662	-6,961	-7,446	-2,578	-2,429	-4,055	-3,598
2600	-1,157	-12,31		+0,800	-1,203	-6,759	-6,248	-2,087	-2,003	-3,206	-3,833
2800	-1,028	-10,93		+0,831	-0,807	-6,577	-5,223	-1,670	-1,638	-2,475	-2,176
3000	-0,915	-9,73		+0,853	-0,469	-6,418	-4,334	-1,302	-1,322	-1,840	-1,604
3200	-0,817	-8,764		+0,871	-0,175	-6,273	-3,561	-0,983	-1,046	-1,285	-1,104
3500	-0,692	-7,321		+0,894	+0,201	-6,094	-2,561	-0,577	-0,693	-0,571	-0,458
4000	-0,526	-5,514		+0,920	+0,699	-5,841	-1,239	-0,035	-0,221	+0,382	+0,406

\* Значения даны в виде  $\lg K_p$ . Для реакции  $A + B + \dots \rightleftharpoons C + D + \dots + \Delta E_0^\circ$  константа равновесия определена как  $K_p = p_A p_B \dots / p_C p_D \dots$ , где парциальные давления  $p_A$  и т. д. выражены в атм. Если присутствует конденсированная фаза, как в реакции  $\text{C}(\text{графит}) + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}$ , то константа равновесия выражена как  $K_p = \frac{p_{\text{CO}}}{p_{\text{O}_2}^{1/2}}$ . Индекс (газ) используется для обозначения газообразного состояния.  
\*\* Экстраполировано.

Продолжение табл. А.2

	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Температура, К°	NO + 1/2 O <sub>2</sub> + 1/2 N <sub>2</sub> + + 21 477	2N + N <sub>2</sub> + + 225 100	CO + 3H <sub>2</sub> + CH <sub>4</sub> + + H <sub>2</sub> O(гас) + + 45 892	CO + + H <sub>2</sub> O(гас) + + CO <sub>2</sub> + + H <sub>2</sub> + 9 660	CO + 1/2 O <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> + + 6 767	C(графит) + + 1/2 O <sub>2</sub> + + CO + + 27 202	C(гас) + + C(графит) + + 170 390	OH + + 1/2 H <sub>2</sub> + + H <sub>2</sub> O(гас) + + 67 107	H <sub>2</sub> + + 1/2 O <sub>2</sub> + + H <sub>2</sub> O(гас) + + 57 107	2O + O <sub>2</sub> + + 117 172	2H + H <sub>2</sub> + + 103 240
4500	-0,398	-4,103	+0,928	+1,081	-5,613	-0,226	+0,392	+0,153	+1,125	+1,078	
5000	-0,298	-2,970	+0,937	+1,387	-5,400	+0,588	+0,731	+0,450	+1,719	+1,619	
	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12
Температура, °К	1/2 H <sub>2</sub> + + 1/2 I <sub>2</sub> + + HI + 1 090	1/2 H <sub>2</sub> + + 1/2 Br <sub>2</sub> (гас) + + HBr + 12 220	1/2 H <sub>2</sub> + + 1/2 Cl <sub>2</sub> + + HCl + 22 019	1/2 H <sub>2</sub> + + 1/2 F <sub>2</sub> + + HF + 64 200	2I + I <sub>2</sub> (гас) + + 35 544	2Br + Br <sub>2</sub> (гас) + + 45 440	2Cl + Cl <sub>2</sub> + + 57 220	2F + F <sub>2</sub> + + 35 600	CN + C(гас) + + N + 187 000	CN + 1/2 C <sub>2</sub> N <sub>2</sub> + + 58 735	NO + + 1/2 O <sub>2</sub> + + NO <sub>2</sub> + + 12 775
300	-1,465	-9,534	-16,591	-47,24	-21,029	-28,410	-36,67	-20,48	-131,26	-	-6,42
400	-1,233	-7,277	-12,566	-31,52	-14,444	-19,710	-26,08	-13,84	-97,00	-	-3,94
600	-0,975	-5,002	-8,524	-23,80	-7,835	-11,275	-15,44	-7,12	-62,67	-	-1,44
800	-0,832	-3,850	-6,489	-17,90	-4,513	-7,039	-10,07	-3,73	-45,45	-	-0,18
1000	-0,742	-3,151	-5,259	-14,35	-2,510	-4,486	-6,83	-1,67	-33,10	-5,765	+0,57
1200	-0,680	-2,682	-4,436	-12,00	-1,168	-2,775	-4,66	-294	-28,18	-4,131	+1,08
1400	-0,635	-2,347	-3,846	-10,30	-0,205	-1,545	-3,10	+692	-23,23	-2,965	+1,43
1600				-9,03			-1,93	+1,440	-19,51	-2,116	+1,69
1800				-8,05			-1,02	+2,068	-16,61	-1,427	+1,89
2000				-7,25			-0,28	+2,494	-14,30	-0,892	+2,07
2200				-6,566				+2,816	-12,39	-0,456	+2,18
2400				-6,046				+3,184	-10,81	-0,093	+2,29
2600				-5,593				+3,476	-9,47	+0,112	+2,39
2800				-5,199				+3,712	-8,32	+0,471	+2,48
3000				-4,880				+3,964	-7,32	+0,698	+2,56
3200				-4,556				-6,63	-6,63	+0,894	+0,894
3500				-4,166				-5,43	-5,43	+1,148	+1,148
4000				-3,648				-3,84	-3,84	+1,544	+1,544

Продолжение табл. А.2

Температура, °K	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12
4500	$\frac{1}{2}\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{I}_2 \rightleftharpoons \text{HI} + 1090$	$\frac{1}{2}\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{Br}_2(\text{газ}) \rightleftharpoons \text{HBr} + 12220$	$\frac{1}{2}\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{Cl}_2 \rightleftharpoons \text{HCl} + 22019$	$\frac{1}{2}\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{F}_2 \rightleftharpoons \text{HF} + 64200$	$\text{I}_2(\text{газ}) \rightleftharpoons 2\text{I} + 55544$	$2\text{Br} \rightleftharpoons \text{Br}_2(\text{газ}) + 45440$	$2\text{Cl} \rightleftharpoons \text{Cl}_2 + 57220$	$2\text{F} \rightleftharpoons \text{F}_2 + 35600$	$\text{CN} \rightleftharpoons \text{C}(\text{газ}) + \text{N} + 187000$	$\text{CN} \rightleftharpoons \frac{1}{2}\text{C}_2\text{N}_2 + \text{N} + 58735$	$\text{NO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{NO}_2 + 12775$
5000				$-3,244$ $-2,930$					$-2,67$ $-1,74$	$+1,750$ —	
Температура, °K	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23
300	$\text{CF}_4 + 4\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4 + 4\text{HF} + 56700$	$\text{O}_3 \rightleftharpoons \frac{3}{2}\text{O}_2 + 34513$	$\text{O}_2 + \text{O} \rightleftharpoons \text{O}_3 + 24137$	$\text{HCN} \rightleftharpoons \frac{1}{2}\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{N}_2 + \text{C}(\text{графит}) + 31280$	$\text{S}_2 + \text{C}(\text{графит}) \rightleftharpoons \text{CS}_2 + 2498$	$\text{C}_2\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{C}(\text{графит}) + 54329$	$\text{C}(\text{графит}) \rightleftharpoons 2\text{H}_2 + \text{CH}_4 + 15987$	$0,5\text{N}_2 + 1,5\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{NH}_3 + 9368$	$\text{SO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{SO}_2 + 79300$	$\frac{1}{2}\text{S}_2(\text{газ}) \rightleftharpoons \text{O}_2 + \text{S}(\text{газ}) + 85860$	$2\text{S}(\text{газ}) \rightleftharpoons \text{S}_2(\text{газ}) + 102590$
300	$-46,73$	$-28,29$	$-11,83$	$-20,98$	$-1,68$	$-36,41$	$-8,884$	$-2,870$	$-54,24$	$-59,33$	$-69,92$
400	$-36,26$	$-22,15$	$-7,16$	$-15,21$	$-1,50$	$-26,54$	$-5,356$	$-0,817$	$-39,68$	$-43,56$	$-51,00$
600	$-25,61$	$-15,98$	$-2,48$	$-9,55$	$-1,11$	$-16,70$	$-2,000$	$+1,356$	$-25,09$	$-27,78$	$-32,01$
800	$-20,09$	$-12,89$	$-0,13$	$-6,73$	$-0,91$	$-11,90$	$+0,149$	$+2,509$	$-17,80$	$-19,88$	$-22,48$
1000	$-16,72$	$-11,03$	$+1,29$	$-5,04$	$-0,80$	$-8,87$	$+1,007$	$+3,225$	$-13,42$	$-15,14$	$-16,74$
1200	$-14,40$	$-9,79$	$+2,24$	$-3,92$	$-0,73$	$-6,94$	$+1,893$	$+3,712$	$-10,50$	$-11,99$	$-12,89$
1400	$-12,74$	$-8,89$	$+2,92$	$-3,12$	$-0,68$	$-5,56$	$+2,363$	$+4,065$	$-8,41$	$-9,73$	$-10,14$
1600	$-11,47$	$-8,22$	$+3,42$	$-2,53$	$-0,64$	$-4,51$	$+2,870$	$+4,332$	$-6,85$	$-8,04$	$-8,08$
1800	$-10,47$	$-7,70$	$+3,82$	$-2,07$	$-0,61$	$-3,71$	$+3,119$	$+4,539$	$-5,61$	$-6,70$	$-6,49$
2000	$-9,66$	$-7,29$	$+4,15$	$-1,70$	$-0,60$	$-3,09$	$+3,421$	$+4,703$	$-4,67$	$-5,68$	$-5,18$
2200	$-8,99$	$-6,95$	$+4,41$			$-2,56$	$+3,668$		$-3,88$	$-4,82$	$-4,11$
2400	$-8,43$	$-6,66$	$+4,63$			$-2,13$	$+3,873$		$-3,21$	$-4,10$	$-3,25$
2600	$-7,95$	$-6,42$	$+4,81$			$-1,61$	$+4,046$		$-2,65$	$-3,50$	$-2,48$
2800	$-7,54$	$-6,21$	$+4,97$			$-1,47$	$+4,194$		$-2,17$	$-2,98$	$-1,85$
3000	$-7,18$	$-6,03$	$+5,11$			$-1,20$	$+4,324$				$-1,29$
3200											$-0,801$
3500											$+0,073$
4000											$+0,669$
4500											$+1,327$
5000											$+1,854$