

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОТКРЫТЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ  
МИНИСТЕРСТВА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

18/16/2

Одобрено кафедрой  
«Теплотехника и гидравлика  
на железнодорожном  
транспорте»

## ***ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА***

Задание на контрольную работу  
с методическими указаниями  
для студентов IV курса

специальности

330100 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ  
В ТЕХНОСФЕРЕ (БЖТ)



Москва – 2004

## ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Задание составлено в соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования в соответствии с государственными требованиями к минимуму содержания и уровню подготовки инженера по специальности 330100 (БЖТ)

Составитель — доц. МАЛЬЦЕВ А.И.

Выполнению контрольной работы должно предшествовать тщательное изучение соответствующего раздела курса. При ее выполнении студент должен сначала письменно ответить на контрольные вопросы, а затем решить соответствующие задачи (контрольные вопросы и условия задач должны быть переписаны в пояснительную записку). Задание состоит из двух вопросов и четырех задач.

Студент выбирает контрольные вопросы по таблице вариантов – соответственно последней цифре своего учебного шифра.

Ответы на контрольные вопросы должны быть четкими и исчерпывающими. Их необходимо сопровождать формулами, графиками, схемами.

При решении задач студент указывает, по какой формуле и в каких единицах измерения определяются величины, откуда взяты представленные в формулу значения (если они не содержатся в условиях задачи).

При использовании таблиц, диаграмм, эмпирических формул и других справочных материалов надо сделать ссылку на литературный источник.

В Приложениях 1 и 2 к заданию приведены справочные таблицы.

Вычисления всех величин рекомендуется проводить в развернутом виде с соблюдением единой системы единиц. Если подставляемая в формулу величина определяется по какой либо расчетной зависимости, это промежуточное вычисление подробно записывается. Обозначения величин и терминология в пояснительной записке должны соответствовать принятым в учебниках.

При подготовке к экзаменам студенту рекомендуется проработать все контрольные вопросы и задачи, приведенные в заданиях.

### ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ

#### Исходные данные

	Вариант (последняя цифра учебного шифра)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Номера контрольных вопросов	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

## Контрольные вопросы

1. Что такое горение? Каковы важнейшие процессы при горении?
2. Перечислите основные виды горения и дайте их характеристику.
3. Охарактеризуйте критические условия возникновения и распространения пламени.
4. Как происходит зажигание горючих газовых смесей? Как происходит самовоспламенение?
5. Распространение пламени по газовой смеси. Скорость горения. Факторы, влияющие на скорость горения.
6. Горение твердых веществ. Горение пылей.
7. Расход воздуха при горении. Стехиометрическая смесь.
8. Как производится расчет состава продуктов горения?
9. Как производится расчет адиабатической температуры горения?
10. Показатели пожароопасности веществ и материалов.
11. Что такое взрыв? Назовите его существенные признаки.
12. Состав взрывчатых веществ. Кислородный баланс.
13. Как производится расчет теплоты взрыва?
14. Как производится расчет состава продуктов взрыва?
15. Физическая и химическая стойкость взрывчатых веществ. Чувствительность взрывчатых веществ к удару, трению, нагреву.
16. Основы теории детонации взрывчатых веществ.
17. Ударные волны и поражающее действие взрыва в различных средах.
18. Передача детонации. Направленное действие взрыва.
19. Перечислите основные взрывчатые вещества и дайте им характеристику.
20. Перечислите основные инициирующие вещества и средства взрывания и дайте им характеристику.

### Задача 1

Рассчитать состав продуктов горения, а также найти адиабатическую температуру горения метано-воздушной смеси,

содержащей объемную долю метана, равную  $r_{\text{CH}_4}$ . Стандартная теплота сгорания метана  $H = 887.7$  кДж/моль. Исходные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Величина	Вариант (последняя цифра учебного шифра)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$r_{\text{CH}_4}$	0,055	0,08	0,06	0,075	0,09	0,07	0,05	0,04	0,02	0,03

### Методические указания к решению задачи 1

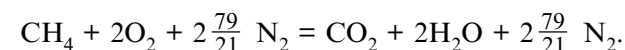
Адиабатической называется температура полного сгорания вещества при отсутствии потерь тепла в окружающую среду. Адиабатическая температура горения  $t_{\text{ад}}$  может быть найдена по закону Гесса из уравнения

$$\sum r_{\text{исх}} i_{\text{исх}} + r_{\text{CH}_4} H = \sum r_{\text{прод}} i_{\text{прод}}, \quad (1)$$

где  $r_{\text{исх}}$  и  $i_{\text{исх}}$  — объемные доли и молярные энтальпии исходных веществ;  $r_{\text{прод}}$  и  $i_{\text{прод}}$  — объемные доли и молярные энтальпии продуктов горения,  $H$  — стандартная теплота реакции. Температура горения здесь присутствует в неявном виде, так как от ее значения зависят энтальпии продуктов реакции.

Для того, чтобы воспользоваться этим уравнением, необходимо знать состав продуктов сгорания заданной метано-воздушной смеси.

Уравнение процесса сгорания метана имеет вид:



Оценим состав продуктов горения. Из уравнения следует, что из 1 моля метана образуется 1 моль  $\text{CO}_2$  и 2 моля  $\text{H}_2\text{O}$ , поэтому продукты сгорания будут содержать объемные доли  $r_{\text{CO}_2} = r_{\text{CH}_4}$  и  $r_{\text{H}_2\text{O}} = 2 r_{\text{CH}_4}$ . На горение 1 моля метана расходуется 2 моля  $\text{O}_2$ . Следовательно, воздух в исходной смеси содержится в избытке, и в продуктах горения будет присутствовать непрореагировавший кислород.

Азот, содержащийся в воздухе, не участвует в процессе сгорания и является пассивным балластом.

Количество непрореагировавшего кислорода и азота в продуктах сгорания найдем, учитывая состав исходной смеси, содержащей объемную долю метана, равную  $r_{\text{CH}_4}$  и объемную долю воздуха, равную  $r_{\text{возд}} = 1 - r_{\text{CH}_4}$ , при этом в воздухе содержалось кислорода  $r_{\text{O}_2} = 0,21 r_{\text{возд}} = 0,21(1 - r_{\text{CH}_4})$  и азота  $r_{\text{N}_2} = 0,79 r_{\text{возд}} = 0,79(1 - r_{\text{CH}_4})$ .

Как следует из реакции горения, на горение метана нужно в 2 раза больше кислорода, поэтому из имеющегося в начале кислорода на горение будет израсходовано  $2r_{\text{CH}_4}$  моля. Следовательно, количество непрореагировавшего кислорода в продуктах горения будет равно  $r_{\text{O}_2}^* = r_{\text{O}_2} - 2r_{\text{CH}_4} = 0,21(1 - r_{\text{CH}_4}) - 2r_{\text{CH}_4} = 0,21 - 2,21 r_{\text{CH}_4}$ .

Таким образом, продукты горения метано-воздушной смеси будут иметь следующий состав:

$$\begin{aligned} r_{\text{CO}_2} &= r_{\text{CH}_4}; \\ r_{\text{H}_2\text{O}} &= 2r_{\text{CH}_4}; \\ r_{\text{O}_2}^* &= 0,21 - 2,21r_{\text{CH}_4}; \\ r_{\text{N}_2} &= 0,79(1 - r_{\text{CH}_4}). \end{aligned}$$

При составлении уравнения (1) будем учитывать, что при нормальных температурах исходных веществ величиной их энтальпий можно пренебречь по сравнению с остальными слагаемыми, и тогда уравнение примет вид:

$$r_{\text{CH}_4} H = r_{\text{CO}_2} i_{\text{CO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}} i_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{O}_2}^* i_{\text{O}_2} + r_{\text{N}_2} i_{\text{N}_2}. \quad (2)$$

Поскольку температура продуктов реакции присутствует в правой части в неявном виде, при решении этого уравнения применяем графический метод.

Для этого задаем несколько значений температуры  $t^\circ\text{C}$  (например: 1200, 1400, 1600, 1800, 2000), подсчитываем соответствующие значения правой части уравнения (2), пользу-

ясь значениями молярной энтальпии газов из таблицы Приложения 1 и 2 и строим график зависимости  $\Sigma r_{\text{прод}} i_{\text{прод}}$  от  $t$  (см. рис.1). Далее по значению левой части уравнения (2)  $r_{\text{CH}_4} H$  находим соответствующее значение адиабатической температуры процесса горения  $t_{\text{ад}}$ .

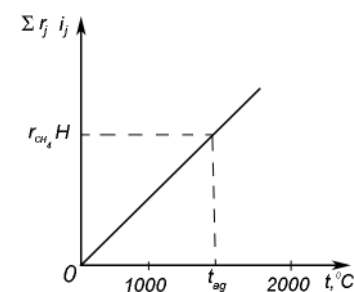


Рис. 1

## Задача 2

Рассчитать состав взрывчатой смеси (бензол + аммиачная селитра) заданного кислородного баланса для исходных данных, приведенных в табл. 2, определить состав продуктов взрыва и теплоту взрыва.

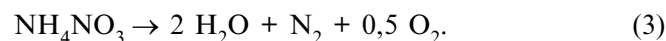
	Последняя цифра учебного шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Кислородный баланс	+ 5	- 5	+ 10	- 10	+ 7	- 7	- 3	+ 3	- 8	+ 8

## Указания к решению задачи 2

Взрывчатая смесь задана указанием компонентов и величиной кислородного баланса. Кислородный баланс  $B$  определяется как недостаток (считается со знаком минус) или избыток (считается со знаком плюс) в граммах кислорода, необходимого для окисления или остающийся неиспользованным при окислении 100 г взрывчатого вещества. Если кислородный баланс нулевой, то смесь исходных веществ называют стехиометрической.

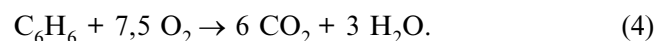
С целью упрощения решения представим, что наше ВВ состоит как бы из двух частей: смеси заданных компонентов нулевого кислородного баланса и добавочного количества одного их компонентов (горючего или окислителя) для обеспечения нужного кислородного баланса. Если затем к такому расчетному количеству одного из компонентов добавить стехиометрическую смесь, доведя общую массу до 100 г, то это и будет ВВ с заданным кислородным балансом. Проведем необходимые вычисления.

Аммиачная селитра, разлагаясь, выделяет кислород:

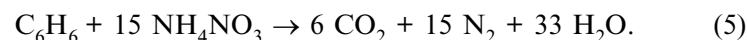


Молярная масса селитры 80, следовательно, 80 г селитры выделяет при разложении 16 г кислорода.

На окисление молекулы бензола (его молекулярный вес 78) требуется 15 атомов кислорода в соответствии с реакцией:



Таким образом, реакция между бензолом и аммиачной селитрой в смеси нулевого кислородного баланса запишется в виде



Тогда, очевидно, соотношение исходных компонентов в смеси составляет:

$$M_{\text{бензола}} : M_{\text{селитры}} = 78:(15 \cdot 80) = 78 : 1200 = 1 : 15,38.$$

Вычислим содержание компонентов М в граммах такой смеси:

$$1 \text{ часть бензола} + 15,38 \text{ частей селитры} = M, \quad (6)$$

откуда содержание бензола составляет

$$M_{\text{бензола}} = M / 16,38, \quad (7)$$

а селитры, соответственно,

$$M_{\text{селитры}} = 15,38 \cdot M_{\text{бензола}}. \quad (8)$$

1). Если кислородный баланс Б положительный (т.е. кислорода в избытке), то нужно взять сначала количество окислителя (селитры) в соответствии с пропорцией по уравнению (3):

$$M_{\text{селитры}}^* : B = 80:16 = 5:1, \quad \text{откуда } M_{\text{селитры}}^* = 5 \cdot B.$$

Добавив к этому количеству  $M = 100 - M_{\text{селитры}}^* = 100 - 5 \cdot B$  стехиометрической смеси, получим ВВ заданного состава. Для того, чтобы найти количество нужных компонентов в М грамм стехиометрической смеси, используем расчетные формулы (7) и (8). Таким образом, окончательный состав ВВ с заданным кислородным балансом будет такой:

$$M_{\text{бензола}} = M / 16,38 = (100 - 5 \cdot B) / 16,38,$$

$$M_{\text{селитры}} = 15,38 \cdot M_{\text{бензола}} + M_{\text{селитры}}^* = 15,38 \cdot (100 - 5 \cdot B) / 16,38 + 5 \cdot B \text{ г.}$$

Легко проверить, что в сумме получится 100 г ВВ.

2). Если кислородный баланс Б отрицательный (т.е. кислорода не хватает, а бензола в избытке), то нужно взять сначала количество излишнего горючего (бензола) в соответствии с пропорцией по уравнению (4):

$$M_{\text{бензола}}^* : B = 78:240 = 1:3,08,$$

$$\text{откуда } M_{\text{бензола}}^* = B / 3,08 = 0,325 \cdot B.$$

Добавив к этому количеству  $M = 100 - M_{\text{бензола}}^* = 100 - 0,325 \cdot B$  грамм стехиометрической смеси, получим ВВ заданного состава. Для того, чтобы найти количество нужных компонентов в М грамм стехиометрической смеси, используем расчетные формулы (7) и (8). Таким образом, окончательный состав ВВ с заданным кислородным балансом будет такой:

$$M_{\text{бензола}} = M / 16,38 + M_{\text{бензола}}^* = (100 - 0,325 \cdot B) / 16,38 + 0,325 \cdot B,$$

$$M_{\text{селитры}} = 15,38 \cdot M / 16,38 = 15,38 \cdot (100 - 0,325 \cdot B) / 16,38.$$

Легко проверить, что в сумме получится 100 г ВВ.

Приготовить подобные смеси весьма просто: нужное количество аммиачной селитры надо смешать с нужным количеством бензола.

Далее следует составить химическую реакцию окисления бензола селитрой в соответствии со своим составом исходных компонентов, при этом в правой части будет присутствовать либо лишний кислород (когда баланс Б положительный), либо лишний углерод (когда Б отрицательный). Реакция составляется исходя из баланса присутствующих в ней химических элементов. После этого можно найти теплоту взрыва  $Q$  по закону Гесса, вычитая из теплоты образования продуктов взрыва (химических соединений) теплоты образования исходных компонентов. По справочнику, теплоты образования химических соединений составляют: для 1 моля бензола - 34,78 кДж/моль, для аммиачной селитры + 366,2 кДж/моль, для  $CO_2$  + 396 кДж/моль, для  $H_2O$  + 242,18 кДж/моль. Полученное значение  $Q$  следует пересчитать в расчете на 1 кг ВВ.

### Задача 3

Рассчитать скорость детонации  $D$  и давление  $P$  на фронте детонационной волны для взрывчатых газовых смесей заданного состава в табл. 3

Таблица 3

Горючее	Вариант (последняя цифра учебного шифра)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
	$H_2$	$C_3H_8$	$H_2$	$C_3H_8$	$H_2$	$C_3H_8$	$H_2$	$C_3H_8$	$H_2$	$C_3H_8$
Окислитель	воздух	$O_2$	воздух	$O_2$	воздух	$O_2$	$O_2$	$O_2$	$O_2$	$O_2$
Кислородный баланс	+5	-5	0	0	-5	+5	0	+3	-3	-3

### Методические указания к решению задачи 3

Используя законы сохранения массы, количества движения, энергии, а также уравнение состояния и уравнение, определяющее точку касания адиабат Гюгонио и Пуассона,

можно получить выражения для расчета параметров детонации газовых смесей при условии, что известны начальные параметры газовой смеси и теплота взрыва.

Скорость детонации:

$$D = 2 (k^2 - 1)q / m/c, \quad (9)$$

где  $q$  – удельная теплота взрыва (Дж/кг),  $k$  – показатель адиабаты.

Давление на фронте ударной волны:

$$P = 2\rho_0 D^2 / (k+1) \text{ Па}, \quad (10)$$

где  $\rho_0$  - плотность исходной газовой смеси, кг/м<sup>3</sup>.

Величину  $k$  можно принять равной 1,28, величину плотности следует определить по составу газовой смеси, пользуясь уравнением состояния при нормальных условиях.

Теплота взрыва находится по закону Гесса, исходя из уравнения химической реакции взрыва, при этом известно, что теплоты образования веществ составляют: для пропана ( $C_3H_8$ ) 109,4 кДж/моль, углекислого газа ( $CO_2$ ) 396 кДж/моль, водяного пара 242 кДж/моль.

### Задача 4

Определить параметры ударной волны в воде (давление на фронте ударной волны  $P$ , удельный импульс  $I$ , плотность потока энергии  $E$ ) на расстоянии  $R$  от точки взрыва заряда тротила массой  $G$ . Найти также радиус зоны взрыва, опасной для рыб, если минимальное поражающее давление на фронте волны составляет 10 бар. Исходные данные приведены в табл.4.

Таблица 4

Величина	Вариант (последняя цифра учебного шифра)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$R$ , м	8	15	10	20	19	25	14	15	35	30
$G$ , кг	1	2	3	10	8	10	3	4	7	6

#### Методические указания к решению задачи 4

При подводном взрыве в момент выхода детонационной волны на поверхность заряда в воде начинает распространяться ударная волна. Вслед за ней движется граница раздела (продукты детонации - вода), и в воде образуется полость с газообразными продуктами детонации.

При детонации заряда из прессованного тротила давление на фронте ударной волны в прилегающем слое воды достигает 130 тыс. бар, плотность воды возрастает в 1,7 раза, а начальная скорость перемещения фронта ударной волны составляет 5500 м/с. При таких давлениях сжимаемость воды приводит к сильной диссипации энергии в ударной волне в ближней зоне взрыва. На расстоянии 10 радиусов заряда в результате потерь на сжатие и разогрев воды энергия ударной волны снижается до 32% и т.д. Параметры ударной волны на расстояниях от 10 до 900 радиусов заряда удобно оценивать по эмпирическим зависимостям, предложенным Р. Коулом.

Величина давления на фронте ударной волны, бар, определяется в соответствии с формулой:

$$P = 522 \left( \frac{\sqrt[3]{G}}{R} \right)^{1,13}. \quad (11)$$

Удельный импульс сжатия Нс/м<sup>2</sup> подсчитывается по формуле:

$$I = 9114 \frac{G^{2/3}}{R},$$

а плотность потока энергии на расстоянии R, Дж/м<sup>2</sup>, по формуле:

$$E = 100 \sqrt[3]{G} \left( \frac{\sqrt[3]{G}}{R} \right)^{2,1}.$$

Радиус зоны поражения для рыб определяется из выражения (11) при P = 10 бар.

Если в задаче дано другое ВВ, то ход решения не меняется, только вместо массы заряда подставляется его тротиловый эквивалент, равный  $G \frac{E_3}{1000}$ , где E<sub>3</sub> – энергия взятого ВВ (ккал/кг).

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Средние объемные теплоемкости газов при  $P=\text{const}$   
в интервале температур  $0+t^{\circ}\text{C}$ , Дж/(м<sup>3</sup>МК).

$t, ^{\circ}\text{C}$	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Воздух
0	1,600	1,299	1,306	1,494	1,297
100	1,700	1,300	1,318	1,505	1,300
200	1,737	1,304	1,335	1,522	1,307
300	1,863	1,311	1,356	1,542	1,317
400	1,930	1,321	1,387	1,565	1,329
500	1,989	1,332	1,398	1,590	1,343
600	2,041	1,345	1,417	1,615	1,456
700	2,088	1,359	1,434	1,641	1,371
800	2,131	1,372	1,450	1,668	1,384
900	2,169	1,385	1,465	1,696	1,398
1000	2,204	1,397	1,478	1,723	1,410
1100	2,235	1,409	1,489	1,750	1,421
1200	2,264	1,420	1,501	1,777	1,433
1300	2,290	1,431	1,511	1,803	1,443
1400	2,314	1,441	1,520	1,828	1,453
1500	2,335	1,450	1,529	1,853	1,462
1600	2,356	1,459	1,538	1,876	1,471
1700	2,374	1,467	1,546	1,900	1,479
1800	2,392	1,475	1,554	1,921	1,487
1900	2,407	1,482	1,562	1,942	1,494
2000	2,422	1,489	1,569	1,963	1,501

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Молярная энтальпия газов при атмосферном давлении,  
кДж/моль

$t, ^{\circ}\text{C}$	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	воздух	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	3,81	2,90	2,95	3,37	2,91	2,92	2,89	3,68
200	8,01	5,82	5,98	6,82	5,86	5,86	5,81	7,88
300	12,52	8,78	9,11	10,36	8,85	8,85	8,73	12,67
400	17,29	11,79	12,34	14,03	11,90	11,90	11,67	18,06
500	22,27	14,87	15,66	17,80	15,04	15,04	14,62	23,97
600	27,43	18,01	19,04	21,70	18,23	18,24	17,58	30,39
700	39,46	21,22	22,49	25,73	21,49	21,51	20,57	37,27
800	38,19	24,50	25,98	29,89	24,80	24,84	23,60	44,69
900	43,73	27,81	29,52	34,19	28,18	28,22	26,66	52,47
1000	49,36	31,17	33,10	38,59	31,58	31,64	29,77	60,46
1100	55,07	34,58	36,69	43,12	35,02	35,11	32,92	68,65
1200	60,85	38,02	40,33	47,76	38,51	38,60	36,10	76,95
1300	66,68	41,50	43,99	52,50	42,03	42,12	39,34	-
1400	72,55	45,00	47,67	57,33	45,54	45,68	42,62	-
1500	78,47	48,52	51,39	62,25	49,12	49,25	45,94	-
1600	84,42	52,07	55,11	67,24	52,71	52,85	49,29	-
1700	90,41	55,64	58,88	72,34	56,31	56,45	52,68	-
1800	96,43	59,22	62,66	77,47	59,94	60,08	56,11	-
1900	102,46	62,81	66,47	82,66	63,58	63,72	57,55	-
2000	108,51	66,42	70,30	87,93	67,24	67,37	63,06	-
2100	114,58	70,05	74,13	93,25	70,90	71,04	66,73	-
2200	120,66	73,68	78,01	98,60	74,59	74,71	70,11	-
2300	126,75	77,33	81,90	104,01	78,28	78,39	73,68	-
2400	132,84	80,98	85,82	109,48	82,00	82,09	77,27	-
2500	138,94	84,64	89,75	114,96	85,70	85,79	80,91	-



***ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА***

Задание на контрольную работу  
с методическими указаниями

Редактор *Г.В. Тимченко*  
Компьютерная верстка *Ю.А. Варламова*

ЛР № 020307 от 28.11.91

---

Тип. зак.	Изд. зак. 378	Тираж 300 экз.
Подписано в печать 02.09.04	Гарнитура Times.	Офсет
Усл. печ. л. 1,0		Формат 60×90 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>

---

Издательский центр РГОТУПС,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Типография РГОТУПС, 125993, Москва, Часовая ул., 22/2