

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

ГОУ ВПО ЛНР «ЛУГАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ТАРАСА ШЕВЧЕНКО»

А.В. Калайдо

# Теория горения и взрыва

Учебное пособие  
с вариантами заданий для самостоятельной работы  
для студентов очной и заочной форм обучения  
направления подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность»

Луганск  
2019

УДК 539.91(076)  
ББК 24.543р3  
К17

**Рецензенты:**

- Сидельникова О.П.* – профессор кафедры безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», доктор технических наук, профессор;
- Щербакова Е.В.* – доцент кафедры техносферной безопасности ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», кандидат технических наук, доцент;
- Хрусталева Н.М.* – доцент кафедры химии и биохимии ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Тараса Шевченко», кандидат химических наук, доцент.

- Калайдо А.В.  
К17 Теория горения и взрыва : учебное пособие с вариантами заданий для самостоятельной работы / А.В. Калайдо; ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Тараса Шевченко». – Луганск : Книта, 2019. – 92 с.

В учебном пособии с вариантами заданий для самостоятельной работы «Теория горения и взрыва» в полном объеме изложен лекционный материал дисциплины, в практической части показаны подходы к решению типовых задач и рассмотрено большое количество примеров решения по всем темам курса, которые могут быть включены в задание для самостоятельной работы.

Пособие предназначено для студентов 2 курса очной и заочной форм обучения, обучающихся по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность».

УДК 539.91(076)  
ББК 24.543р3

*Рекомендовано Учебно-методическим советом Луганского национального университета имени Тараса Шевченко в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность» (протокол № от )*

© Калайдо А.В., 2019  
© ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Тараса Шевченко», 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
---------------	---

### ГЛАВА I. ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ

Раздел 1. Общие сведения о горении.....	8
1.1 Основные определения.....	8
1.2 Виды горения и их характеристики.....	9
Раздел 2. Физико-химические основы горения.....	12
2.1 Законы горения веществ и материалов в воздухе.....	12
2.2 Определение расхода воздуха на горение.....	14
2.3 Определение объема продуктов горения.....	16
<i>Практическое занятие № 1. Реакции горения и расход воздуха на горение.....</i>	<i>20</i>
Задание к самостоятельной работе № 1.....	24
<i>Практическое занятие № 2. Определение объема и процентного состава продуктов горения.....</i>	<i>26</i>
Задание к самостоятельной работе № 2.....	29
Раздел 3. Характеристики процесса горения материалов.....	32
3.1 Классификация и характеристика пожароопасных веществ.....	32
3.2 Самовозгорание, его виды.....	34
<i>Практическое занятие № 3. Расчет самовозгорания твердых горючих веществ.....</i>	<i>36</i>
Задание к самостоятельной работе № 3.....	39
Раздел 4. Особенности горения различных веществ и материалов.....	40
4.1 Горение газов.....	40
4.2 Горение жидкостей.....	42
4.3 Горение твердых веществ.....	43
4.4 Тепловые эффекты реакций горения.....	44
<i>Практическое занятие № 4. Определение концентрационных пределов воспламенения.....</i>	<i>46</i>
Задание к самостоятельной работе № 4.....	50

### ГЛАВА II. ТЕОРИЯ ВЗРЫВА

Раздел 5. Общие сведения о взрыве и взрывчатых веществах.....	52
5.1 Общие сведения о взрывных процессах.....	52
5.2 Взрывчатые вещества, их классификация.....	54
5.3 Характеристики взрывчатых веществ.....	56
<i>Практическое занятие № 5. Определение параметров взрыва веществ и смесей.....</i>	<i>58</i>
Задание к самостоятельной работе № 5.....	61
Раздел 6. Ударные волны.....	63
6.1 Ударная волна, ее структура и параметры.....	63
6.2 Отражение ударных волн от преград.....	65
6.3 Последствия действия ударных волн на сооружения и человека...	66

<i>Практическое занятие № 6. Оценка разрушающего действия взрывной волны</i> .....	69
Задание к самостоятельной работе № 6.....	71
Раздел 7. Взрывы пылевоздушных смесей.....	72
7.1 Классификация и физико-химические характеристики пыли.....	72
7.2 Характеристики пожаровзрывоопасности пылевоздушных смесей....	74
7.3 Расчетные параметры взрыва пылевоздушных смесей.....	75
<i>Практическое занятие № 7. Оценка последствий взрыва пылевоздушной смеси</i> .....	76
Задание к самостоятельной работе № 7.....	77
Раздел 8. Ядерные взрывы.....	78
8.1 Физические основы высвобождения ядерной энергии.....	78
8.2 Ядерные взрывы, их классификация и поражающие факторы.....	80
<i>Практическое занятие № 8. Оценка поражающих факторов ядерного взрыва</i> .....	83
Задание к самостоятельной работе № 8.....	85
Вопросы для подготовки к экзамену по дисциплине «Теория горения и взрыва».....	86
Список рекомендованной литературы.....	88
Приложения.....	90

## ВВЕДЕНИЕ

Процессы горения постоянно сопутствуют деятельности человека, с давних времен и до сегодняшних дней являясь источником тепла и энергии. В то же время, пожары и взрывы также неизменно сопровождают сферу материального производства, причиняя значительный материальный и социальный ущерб, приводя к человеческим жертвам. Причиной всех крупнейших техногенных катастроф индустриального общества являются именно неконтролируемые процессы горения и взрыва.

Масштабнейшая техногенная катастрофа в индийском Бхопале в декабре 1984 г. (утечка метилизоцианата на химическом комбинате американской компании Union Carbide) унесла жизни 3150 человек и привела к отравлению около 200 000, еще более 15 000 человек погибло от ее последствий на протяжении следующих пяти лет. В Советском Союзе взрыв скопившегося природного газа на железнодорожном перегоне Челябинск - Уфа в 1989 г. практически полностью уничтожил два пассажирских поезда, в результате чего погибли 575 и получили тяжелые ранения 623 человека. Последствия взрыва парогазовой смеси в реакторе 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС нанесли колоссальный урон Биосфере и генофонду населения прилегающих территорий, оценить материальный ущерб в принципе не представляется возможным.

Ввиду чрезвычайной тяжести последствий пожаров и взрывов в сфере производства практически единственным эффективным решением проблемы становится их профилактика. Поэтому качественная подготовка специалистов по направлению 20.03.01 «Техносферная безопасность» по вопросам предотвращения пожаров и взрывов является крайне актуальной в современных условиях.

*Теория горения и взрыва* относится к циклу естественнонаучных дисциплин, используя в качестве теоретической основы материал общей химии. В процессе ее изучения рассматриваются теоретические и практические аспекты горения и взрыва, процессы сжигания горючих веществ и топлива, вопросы безопасного обслуживания технологических процессов, использующих горение и взрывы. Изучение основных закономерностей возникновения и механизмов развития процессов горения и взрыва, а также формирование навыков определения количественных показателей данных процессов для веществ любого химического состава в рамках дисциплины «Теория горения и взрыва» требует грамотной организации практической части курса. Выработка умений и навыков проведения инженерных расчетов в области горения и взрыва достигается на практических занятиях и в процессе самостоятельной работы студентов.

Данное издание преследует две цели: во-первых – предоставить студентам лекционный материал в полном объеме, сориентировать на наиболее важные вопросы курса, помочь в подготовке к итоговому контролю; во-вторых – способствовать овладению студентами не менее

важной практической частью курса, подготовить их к эффективному выполнению самостоятельной работы, и предоставить всю необходимую для этого информацию.

Данное учебное пособие предназначено для студентов направления подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность», однако оно может быть использовано также студентами других специальностей при изучении основ пожарной безопасности в рамках дисциплины «Охрана труда».

Пособие составлено в полном соответствии с действующей программой курса «Теория горения и взрыва», оно состоит из двух глав, каждая из которых включает по четыре раздела. В учебном пособии уделено значительное внимание базовым понятиям и законам теории горения, подробно рассмотрен порядок составления реакций горения для веществ и материалов различного химического состава. Изложение теоретического материала сопровождается детальным описанием методов решения задач и примерами их решения по всем без исключения темам курса. Контрольные вопросы в конце каждой главы должны сориентировать студентов на наиболее важные моменты теоретической части.

Особенностью данного издания является сочетание классического учебника и пособия к организации самостоятельной работы студентов. Основные трудности при выполнении внеаудиторных расчетных заданий обусловлены большим объемом вычислений и слабой подготовкой студентов по смежной дисциплине – общей химии. Поэтому для повышения эффективности самостоятельной работы студентов к каждому типовому заданию прилагается пошаговый алгоритм его выполнения и примеры решения данного задания с подробными пояснениями.

Перед выполнением индивидуальных заданий студенты должны прослушать теоретический материал по данной теме на лекции, рассмотреть решение подобного задания на практическом занятии и только после этого приступить непосредственно к выполнению самостоятельной работы. Для более эффективного использования пособия рекомендуется следующий алгоритм работы: студент повторяет лекционный материал, знакомится с порядком решения задачи по данной теме, детально разбирает примеры решения данной задачи, приведенные в пособии, пытается решить данную задачу самостоятельно и сравнивает полученные результаты с авторскими. Только после успешного освоения типовых задач можно приступать к решению своей задачи по данной теме. В случае возникновения трудностей при решении студент обращается за консультацией к преподавателю на ближайшем практическом занятии.

# ГЛАВА I ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ

## РАЗДЕЛ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГОРЕНИИ

### 1.1 Общие сведения о процессе горения

**Горение** – сложный физико-химический процесс, основой которого является быстро протекающая экзотермическая реакция окисления вещества, сопровождающаяся выделением значительного количества тепла и наличием свечения (пламени) и дыма. В процессе горения исходные горючие вещества превращаются в продукты сгорания

В отличие от выделяющейся теплоты, пламя и дым не являются обязательными спутниками горения:

- *пламя* – видимая зона горения, от которой идет свечение и инфракрасное излучение. Но при определенных условиях может наблюдаться беспламенное горение твердого вещества при температурах 400 - 600°C, сопровождающееся выделением дыма и называемое тлением;

- *дым* – аэрозоль, образованный жидкими и твердыми продуктами неполного сгорания материалов. В то же время, при полном сгорании образуются продукты, не способные к дальнейшему горению, то есть дым отсутствует.

Для возникновения процесса горения необходимо наличие горючего вещества, окислителя и достаточного по мощности источника зажигания, общая схема горения показана на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Схема возникновения горения

*Источник зажигания* – горячее или раскаленное тело, а также электрический разряд, обладающие достаточной для возникновения горения других веществ температурой (пламя, искры, раскаленные поверхности, теплота, выделяющаяся в процессе химических реакций и от трения и др.). Под действием источника зажигания горючее вещество разлагается с образованием газопаровоздушной смеси.

*Горючая среда* формируется одновременным присутствием горючего вещества и окислителя. При этом горючее вещество и окислитель в данной среде должны находиться в определенном диапазоне соотношений друг с другом.

*Горючее вещество* – вещество в любом агрегатном состоянии (твердом, жидком или газообразном), способное самостоятельно гореть после удаления источника зажигания. В качестве горючего, способного взаимодействовать с окислителем, может выступать огромное количество веществ: большинство металлов, сера, водород и органические вещества. Но наибольшее распространение получили углеводородные вещества (газ, нефть, уголь и т.п.).

*Окислитель* – вещество, атомы которого в процессе химической реакции присоединяют электроны другого вещества (восстановителя). Класс окислителей также весьма обширен, однако в реальных условиях окислителем практически всегда выступает кислород воздуха.

В зависимости от соотношения горючего вещества и окислителя горючие смеси делятся на три типа (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Классификация горючих смесей по составу

Богатые смеси содержат в избытке горючее вещество, а бедные – окислитель. Но наиболее пожароопасными являются смеси *стехиометрического состава* – оптимального соотношения окислителя и горючего вещества. Они легче воспламеняются и обеспечивают полное сгорание вещества с максимальным выделением теплоты.

Горение невозможно при отсутствии хотя бы одного из его условий (наличия горючего, окислителя и источника зажигания). Показанный на рис 1.3 «символический треугольник» иллюстрирует факторы горения и пути его предотвращения: при отсутствии одной из сторон горение не возникает, а при удалении – прекращается.

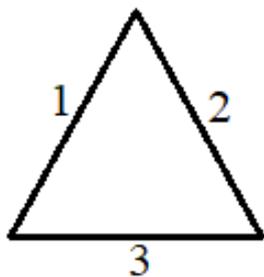


Рисунок 1.3 – Символический треугольник: 1 – горючее вещество; 2 – окислитель; 3 – источник зажигания

## 1.2 Виды горения и их характеристики

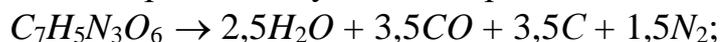
Горение отличается многообразием видов и особенностей, обусловленных процессами теплообмена, газодинамическими эффектами, кинетикой химических превращений, а также обратной связью между внешними условиями и характером развития горения [1]. Поэтому классификация видов горения возможна по целому ряду признаков различной природы.

1. **По агрегатному состоянию** горючего вещества и окислителя различают гомогенное и гетерогенное горение, а также горение взрывчатых веществ.

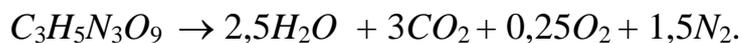
*Гомогенное* – горение, при котором горючее вещество и окислитель находятся в одинаковом фазовом состоянии. Чаще всего это горение газовых смесей в воздушной среде.

*Гетерогенное* – горение, при котором горючее вещество и окислитель находятся в различных фазовых состояниях. К данному виду относится горение любых твердых и жидких веществ в присутствии воздуха.

*Горение взрывчатых веществ* – переход горючего вещества из конденсированного состояния в газообразное. При этом на поверхности раздела фаз в результате химической реакции выделяются теплота и горючие газы, догорающие на некотором расстоянии от поверхности. Примерами такого горения являются реакции с участием тротила



и нитроглицерина



2. **По степени сгорания** горючего вещества горение бывает полным и неполным.

*Полное горение* – протекает при достаточном количестве окислителя, в результате образуются вещества, не способные к дальнейшему окислению (CO<sub>2</sub>, водяной пар и т.д.).

*Неполное горение* – тление, которое протекает при недостаточном содержании окислителя. Сопровождается образованием токсичных и горючих продуктов сгорания (спиртов, кетонов, СО и др.). Поэтому удаление окислителя из зоны горения является одной из мер пожарной профилактики.

3. **По скорости распространения пламени** горение может быть нормальным, взрывным и детонационным.

*Нормальное горение* – спокойное гетерогенное двухфазное горение, при котором скорость движения пламени на границе между сгоревшей и несгоревшей частями смеси не превышает 5 м/с. Подразделяется, в свою очередь, на ламинарное и турбулентное.

Характер нормального горения определяется скоростью поступления окислителя в зону горения. При медленном (диффузионном) поступлении кислорода имеет место ламинарное горение, например – горение свечи. В таком случае скорость распространения пламени не превышает единиц см/с. При улучшении условий перемешивания реагирующих веществ наступает турбулентное горение, завихрение газовых струй приводит к увеличению скорости распространения пламени.

Нормальное горение устойчиво в том случае, если не сопровождается повышением давления, то есть происходит на открытых площадях. В замкнутых объемах продукты сгорания разогревают пограничный слой несгоревшего вещества за счет теплопроводности, а также приводят несгоревший газ в движение. Все это вызывает значительное увеличение поверхности фронта пламени и роста скорости горения. Наблюдается

постепенный переход к взрывному горению, скорость распространения пламени и давление нарастают плавно.

*Взрывное горение* – возникает при достижении скоростей распространения пламени порядка 300...320 м/с, не превышающих однако скорости распространения звука в данной среде. Представляет быстрое химическое превращение вещества с выделением большого количества энергии и образованием сжатых газов, способных производить работу.

Продолжительность такого горения находится в пределах от 0,1 с для газов до 0,5 с для пыли, продукты сгорания могут нагреваться до 3 000°С, а генерируемые при промышленных взрывах ударные волны составляют 2...10 атмосфер. При сильной турбулизации потоков веществ, участвующих в реакции горения, имеет место значительное искривление фронта пламени и большое увеличение его поверхности, что приводит к дальнейшему росту скорости распространения пламени. Горение приобретает детонационный характер, переход носит скачкообразный характер.

*Детонационное горение* – совокупность ударной волны, распространяющейся с постоянной сверхзвуковой скоростью и следующей за ее фронтом зоны химических превращений исходных веществ. Химическая энергия, выделяющаяся в детонационной волне, подпитывает ударную волну, не давая ей затухать.

Скорость распространения детонационной волны  $v$  зависит от теплоемкости продуктов сгорания и определяется по формуле

$$v = \sqrt{2Q(k^2 - 1)}, \quad (1.1)$$

где  $Q$  – тепловой эффект реакции, Дж/кг;  $k$  – показатель адиабаты.

Чаще всего детонационное горение имеет место в трубах, так как требует специфических условий для реализации преддетонационного состояния.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Какая реакция называется экзотермической? Всегда ли процесс горения носит экзотермический характер?
2. В чем различие между полным и неполным сгоранием вещества? Продукты какого сгорания более опасны для здоровья человека?
3. Какова функция окислителя в процессе горения вещества, какие еще окислители (кроме кислорода) Вы знаете?
4. Что понимают под смесями стехиометрического состава, почему такие смеси представляют наибольшую пожароопасность?
5. Приведите классификацию горения по скорости распространения пламени, в чем принципиальное различие между взрывным и детонационным горением?

## РАЗДЕЛ 2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГОРЕНИЯ

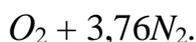
### 2.1 Законы горения веществ и материалов в воздухе

Как уже было выше, процесс горения является многофакторным. Наибольшее влияние на интенсивность его протекания оказывают: состав горючей смеси, давление и температура в зоне горения, агрегатное состояние горючего и окислителя, геометрия зоны горения.

Горение в подавляющем большинстве случаев происходит в воздуха, содержащем по объему 21% кислорода, 78% азота и 0,9% аргона. Но аргон и азот в процессе горения не участвуют, поэтому состав воздуха для простоты расчетов принимают следующим: 21%  $O_2$  и 79%  $N_2$ . Таким образом, объемное соотношение азота и кислорода в воздухе

$$\frac{\varphi_{N_2}}{\varphi_{O_2}} = \frac{79}{21} = 3,76,$$

а молекулярный состав воздуха может быть записан в виде



Поскольку молярные массы азота и кислорода отличаются, то массовое соотношение азота и кислорода в воздухе может быть определено по формуле

$$\frac{\varphi_{N_2} \mu_{N_2}}{\varphi_{O_2} \mu_{O_2}} = \frac{79 \cdot 28}{21 \cdot 32} = 3,29,$$

где  $\mu_{N_2}$  и  $\mu_{O_2}$  – молярные массы азота и кислорода, кг/моль.

Таким образом, на 1 м<sup>3</sup> (кмоль) кислорода в воздухе приходится 3,76 м<sup>3</sup> (кмоль) азота, а на 1 кг кислорода в воздухе приходится 3,29 кг азота.

Все вещества и материалы в теории горения и взрыва принято делить на три группы:

- *индивидуальные вещества* – могут быть заданы одной химической формулой. Пример – изопропиловый спирт  $C_3H_7OH$ ;

- *вещества сложного состава* – их элементный состав, то есть содержание  $C$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $S$ ,  $N$ , золы  $A$  и влаги  $W$  определяется в аналитической лаборатории. Примерами подобных веществ являются древесина, торф, нефть, уголь и т.д.;

- *смеси газов* – механические смеси индивидуальных веществ, примером смеси газов является природный газ, имеющий следующий объемный состав:  $C_2H_6$  – 2%,  $H_2$  – 4%,  $C_4H_{10}$  – 4%,  $CH_4$  – 86%,  $C_3H_8$  – 4%. Горение смесей газов сводится к рассмотрению горения их отдельных компонентов.

К горению способны многие, но далеко не все вещества и химические соединения. Возможность горения конкретного индивидуального вещества определяется безразмерным коэффициентом горючести  $K$ , определяемым по формуле

$$K = 4 \cdot n(C) + 4 \cdot n(S) + n(H) + n(N) - 2 \cdot n(O) - 2 \cdot n(Cl) - 3 \cdot n(F) - 5 \cdot n(Br),$$

где  $n(C)$ ,  $n(S)$ ,  $n(H)$ ,  $n(N)$ ,  $n(O)$ ,  $n(Cl)$ ,  $n(F)$  и  $n(Br)$  – число атомов углерода, серы, водорода, азота, кислорода, хлора, фтора и брома, соответственно, в молекуле горючего вещества.

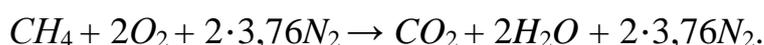
Вещество является горючим, если  $K \geq 1$ , в противном случае – вещество негорючее.

Процесс превращения горючего вещества в продукты горения представляется в виде реакции горения. Конечные продукты реакции определяются из состава горючего вещества при помощи следующих правил:

- углерод горючего при полном сгорании всегда превращается в диоксид углерода  $CO_2$ ;
- водород горючего при полном сгорании превращается в воду  $H_2O$ ;
- число атомов каждого химического элемента в процессе реакции не изменяется (закон сохранения вещества).

Последнее условие выполняется в том случае, когда число атомов данного элемента в обеих частях уравнения одинаково. После составления самого уравнения уравнивают число атомов углерода, затем водорода, потом кислорода. Множитель перед коэффициентом 3,76 у молекулы азота в левой части всегда будет равен коэффициенту перед кислородом.

Выполнение приведенных выше правил показано на примере реакции горения метана

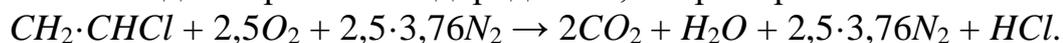


Числа перед химическими элементами называются стехиометрическими коэффициентами, они показывают, сколько вещества участвовало или образовалось в процессе горения. В теории горения расчет ведется на 1 кмоль или 1 м<sup>3</sup> горючего вещества, поэтому коэффициент перед горючим веществом (первым слагаемым в левой части) не ставится, а перед другими веществами могут быть дробные коэффициенты.

Если в составе горючего вещества вместе с углеродом и водородом присутствует азот, то он выделяется при горении в свободном виде  $N_2$ , например



Если в состав горючего вещества входит хлор, то он при горении выделяется в виде хлористого водорода  $HCl$ , например



Сера, входящая в состав горючего вещества, выделяется в виде  $SO_2$ , а фтор – в виде фтористого водорода  $HF$ .

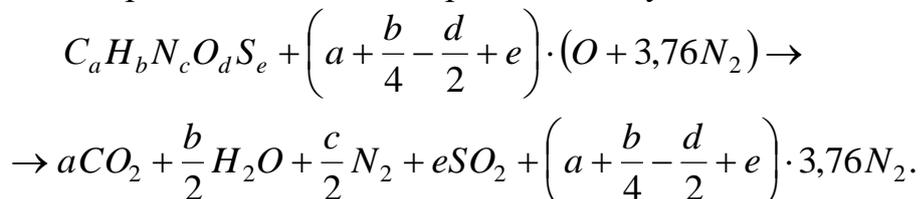
Если горючее вещество представляет собой смесь газов, то реакции горения записываются для каждого горючего компонента смеси, а при горении вещества сложного состава – для каждого горючего химического элемента смеси.

Молекулы некоторых технических продуктов (бензин, керосин, дизельное топливо, масла и т.д.) представляются условной химической формулой вида



где  $a, b, c, d, e$  – число атомов углерода, водорода, азота, кислорода и серы, соответственно. Так, формула растворителя Р-4  $C_{3,231}H_{7,788}O_{0,22}$ , а масла-теплоносителя АМТ-300Т –  $C_{19,04}H_{24,58}S_{0,196}N_{0,04}$

Уравнение горения таких веществ может быть получено с использованием приведенных выше правил в следующем виде:



Все приведенные выше примеры реакций горения могут быть сведены к одному обобщенному **уравнению материального баланса**



где  $A$  – горючее вещество;  $B$  – окислитель;  $C$  и  $D$  – продукты горения;  $n_A, n_B, n_C$  и  $n_D$  – стехиометрические коэффициенты при соответствующих веществах.

Выражение (2.1) представляет собой **брутто-уравнение** реакции горения, поскольку не несет информации о промежуточных стадиях окислительной реакции, а характеризует исключительно начальную и конечную стадии процесса. Использование брутто-уравнений позволяет определять такие практически важные показатели, как количество окислителя (кислорода или воздуха), необходимого для полного сгорания вещества, и объем образовавшихся продуктов сгорания.

## 2.2 Определение расхода воздуха на горение

Наиболее распространенной практической задачей теории горения является определение количества воздуха, необходимого индивидуальных веществ, веществ сложного состава и смесей газов.

Главной количественной характеристикой процесса горения является **теоретически необходимое количество воздуха  $V_{60}$**  – минимальное количество воздуха, необходимое для полного сгорания единицы массы или объема горючего вещества. Так, для 1 кг бензина  $V_{60} = 14,3$  кг; для водорода – 3,1 кг; для природного газа – 6,45 кг.

Для **индивидуальных горючих веществ** независимо от их агрегатного состояния теоретически необходимое количество воздуха определяется из уравнений реакции горения по формулам:

- для полного сгорания 1 кмоль (1 кг) горючего вещества

$$V_{60} = \frac{n_{O_2} + n_{N_2}}{n_2}, \quad (2.2)$$

- для полного сгорания 1 кг горючего вещества

$$V_{60} = 22,4 \cdot \frac{n_{O_2} + n_{N_2}}{n_2 \cdot \mu}, \quad (2.3)$$

где  $n_2, n_{O_2}$  и  $n_{N_2}$  – количество горючего вещества, кислорода и азота, определяемые из реакции горения, кмоль;  $\mu$  – молярная масса, кг/кмоль.

На практике в качестве горючих веществ часто выступают *вещества сложного состава*, такие как древесина, торф, сланцы, нефть и т.п. В этом случае для определения теоретически необходимого объема воздуха нужно знать элементный состав сложного горючего вещества (содержание  $C, H, O, S, N$ , золы  $A$  и влаги  $W$ ), выраженный в массовых процентах, который определяется в аналитической лаборатории.

При расчете теоретического необходимого количества воздуха  $V_{e0}$  для полного сгорания горючего вещества составляют реакции горения по каждому горючему элементу, входящему в состав сложного вещества.

Зола, влага и азот в горении не участвуют, для остальных элементов реакции горения имеют вид:

1.  $C + O_2 \rightarrow CO_2$ .  $12 + 32 = 44$ , то есть для сгорания 12 кг  $C$  необходимо 32 кг  $O_2$ .
2.  $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ .  $4 + 32 = 36$ , то есть для сгорания 4 кг  $H$  необходимо 32 кг  $O_2$ .
3.  $S + O_2 \rightarrow SO_2$ .  $32 + 32 = 64$ , то есть для сгорания 32 кг  $S$  необходимо 32 кг  $O_2$ .

Количество воздуха, необходимое для сжигания 1% массы (0,01 кг) каждого из веществ

$$\varphi_C = \frac{32}{12} \cdot 0,01; \quad \varphi_H = \frac{32}{4} \cdot 0,01 \quad \varphi_S = \frac{32}{32} \cdot 0,01$$

Тогда масса кислорода, необходимая для сгорания 1 кг горючего вещества

$$\begin{aligned} & \frac{32 \cdot 0,01}{12} [C] + \frac{32 \cdot 0,01}{4} [H] + \frac{32 \cdot 0,01}{32} [S] - \frac{32 \cdot 0,01}{32} [O] = \\ & = \frac{0,08}{3} [C] + 0,08 [H] + 0,01 [S] - 0,01 [O], \end{aligned}$$

где  $[C]$ ,  $[H]$ ,  $[S]$  и  $[O]$  – массовые доли углерода, водорода, серы и кислорода в веществе сложного состава, %.

На вычисленную массу кислорода в воздухе приходится в 3,29 раз больше азота, поэтому масса воздуха  $m_e$ , необходимая для горения 1 кг вещества, может быть выражена формулой:

$$\begin{aligned} m_e &= (1 + 3,29) \cdot \left( \frac{0,08 [C]}{3} + 0,08 [H] + 0,01 [S] - 0,01 [O] \right) = \\ &= 0,3478 \cdot \left( \frac{[C]}{3} + [H] + \frac{[S]}{8} - \frac{[O]}{8} \right). \end{aligned}$$

Переходя от массы воздуха к его объему сложного вещества, получаем окончательную формулу для расчета объема воздуха, теоретически необходимого для его полного сгорания

$$V_{e0} = \frac{m_e}{\rho_e} = \frac{0,3478}{1,293} \cdot \left( \frac{[C]}{3} + [H] + \frac{[S]}{8} - \frac{[O]}{8} \right) = 0,269 \cdot \left( \frac{[C]}{3} + [H] + \frac{[S]}{8} - \frac{[O]}{8} \right), \quad (2.4)$$

где  $1,293 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха при нормальных условиях.

Если горючее вещество представляет собой *смесь газов*, то сначала по формуле (2.2) находится теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания единицы объема каждого горючего компонента смеси. Затем полученные значения умножаются на объемную долю соответствующего компонента (в %) и суммируются. Если в исходной смеси газов присутствует кислород, то расход воздуха на горение данной смеси снижается на соответствующую величину.

Объем воздуха, теоретически необходимый для сгорания единицы объема смеси газов, выражается формулой

$$V_{\text{e}0} = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{n_{iO_2}}{n_{i_2}} \cdot \varphi_i - \varphi_{O_2}}{21}, \quad (2.5)$$

где  $n_{iO_2}$  – коэффициент перед кислородом в реакции горения  $i$ -го компонента газовой смеси;  $n_{i_2}$  – коэффициент перед  $i$ -м компонентом газовой смеси;  $\varphi_i$  – объемная доля  $i$ -го компонента в газовой смеси, %;  $\varphi_{O_2}$  – объемная доля кислорода в исходной газовой смеси, %;  $k$  – количество компонент в горючей смеси газов.

При расчете объема воздуха  $V_{\text{e}}$ , расходуемого на сгорание произвольного объема смеси газов, рассчитанное по формуле (2.4) значение необходимо умножить на заданный объем смеси.

Выражения (2.2) – (2.5) справедливы для нормальных условий ( $T = 273$  К,  $P = 101\,325$  Па), при необходимости приведения объема воздуха к иным условиям следует использовать формулу

$$V_{\text{e}(T,P)} = V_{\text{e}0} \cdot \frac{101\,325 \cdot T}{273 \cdot P}. \quad (2.6)$$

В реальных условиях пожара в зону горения чаще всего поступает количество воздуха, превышающее теоретически необходимое. *Практическое количество воздуха*  $V_{\text{e}}$  – объем воздуха, фактически поступивший в зону горения. Отношение практического объема воздуха к теоретическому называется *коэффициентом избытка воздуха*  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{V_{\text{e}}}{V_{\text{e}0}}. \quad (2.7)$$

Разность между практическим и теоретическим объемами воздуха называется *избытком воздуха*  $\Delta V_{\text{e}}$ :

$$\Delta V_{\text{e}} = V_{\text{e}} - V_{\text{e}0} = V_{\text{e}0} \cdot (\alpha - 1). \quad (2.8)$$

Часто в пожарно-технических расчетах требуется определить массу воздуха, пошедшего на горение

$$m_{\text{e}} = V_{\text{e}} \cdot \rho_{\text{e}} = 3,47 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{V_{\text{e}} \cdot P}{T}, \quad (2.9)$$

где  $\rho_{\text{e}}$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

### 2.3 Определение объема продуктов горения

Практически всегда процесс горения сопровождается образованием продуктов полного и неполного сгорания вещества. К первым относятся углекислый газ, вода, оксид серы и азот; ко вторым – угарный газ, сажа и смолы. Ввиду сложности процесса горения считается, что любое вещество сгорает полностью до конечных продуктов. В состав продуктов горения также включают азот воздуха, пошедшего на горение и избыток воздуха, если таковой имеется.

Объем и состав продуктов горения *индивидуального вещества* определяется из уравнения реакции горения. Для веществ в твердом или жидком состоянии расчет объема продуктов горения производят в м<sup>3</sup> на 1 кг горючего вещества (м<sup>3</sup>/кг). Для газообразных горючих веществ расчет выполняется в м<sup>3</sup> на 1 м<sup>3</sup> горючего вещества (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>) или, что то же самое – в кмоль/кмоль.

Сначала определяется объем каждого из продуктов горения, образовавшегося в результате полного сгорания горючего вещества

$$V_{CO_2} = \frac{n_{CO_2}}{n_2}, \quad V_{H_2O} = \frac{n_{H_2O}}{n_2}, \quad \dots, \quad V_{N_2} = \frac{n_{N_2}}{n_2}, \quad (2.10)$$

где  $n_{CO_2}$ ,  $n_{H_2O}$  и  $n_{N_2}$  – количество продуктов горения, кмоль;  $n_2$  – количество горючего вещества, кмоль.

Полный объем продуктов горения определяется суммированием найденных в (2.10) объемов

$$V_{n_2} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + \dots + V_{N_2}. \quad (2.11)$$

Если вещество находится в конденсированном состоянии, то формула (2.11) приобретает вид

$$V_{n_2} = V_O \cdot \frac{\sum_{i=1}^k n_{n_i}}{n_2 \mu_2}, \quad (2.11)$$

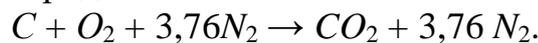
где  $k$  – число продуктов горения;  $\mu_2$  – молярная масса горючего вещества, кг/кмоль.

В случае, когда горючее вещество представляет собой *смесь газов*, расчет объема продуктов горения производится отдельно по каждому из веществ с последующим суммированием с учетом процентного содержания каждого индивидуального вещества.

Чаще всего на практике приходится определять объем продуктов горения *сложного вещества*, элементный состав которого определяется в лаборатории и задается в виде процентного содержания углерода, кислорода, серы, азота, водорода, фосфора, золы и влаги. Теоретический выход продуктов горения сложного вещества определяется как сумма продуктов горения каждого элемента, входящего в состав данного вещества. К горючим элементам веществ сложного состава относятся углерод, водород, сера и фосфор. Если в состав вещества входит кислород, то он участвует в горении и в результате расходуется меньше кислорода из воздуха.

Теоретический объем продуктов горения, которые образуются при сгорании  $m = 1$  кг каждого элемента при нормальных условиях:

- при горении углерода

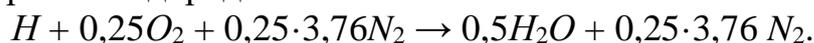


Объем продуктов горения

$$V_{CO_2} = V_m \cdot \frac{m \cdot n_{CO_2}}{\mu} = 22,4 \cdot \frac{1 \cdot 1}{12} = 1,87 \text{ м}^3;$$

$$V_{N_2} = V_m \cdot \frac{m \cdot n_{N_2}}{\mu} = 22,4 \cdot \frac{1 \cdot 3,76}{12} = 7,0 \text{ м}^3;$$

- при горении водорода

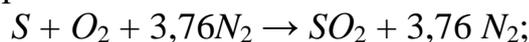


Объем продуктов горения

$$V_{H_2O} = V_m \cdot \frac{m \cdot n_{H_2O}}{\mu} = 22,4 \cdot \frac{1 \cdot 0,5}{1} = 11,2 \text{ м}^3;$$

$$V_{N_2} = V_m \cdot \frac{m \cdot n_{N_2}}{\mu} = 22,4 \cdot \frac{1 \cdot 0,25 \cdot 3,76}{1} = 21,0 \text{ м}^3;$$

- при горении серы

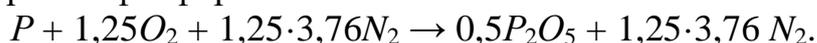


Объем продуктов горения

$$V_{SO_2} = V_m \cdot \frac{m \cdot n_{SO_2}}{\mu} = 22,4 \cdot \frac{1 \cdot 1}{32} = 0,7 \text{ м}^3;$$

$$V_{N_2} = V_m \cdot \frac{m \cdot n_{N_2}}{\mu} = 22,4 \cdot \frac{1 \cdot 3,76}{1} = 2,63 \text{ м}^3;$$

- при горении фосфора



Объем продуктов горения

$$V_{P_2O_5} = V_m \cdot \frac{m \cdot n_{P_2O_5}}{\mu} = 22,4 \cdot \frac{1 \cdot 0,5}{31} = 0,36 \text{ м}^3;$$

$$V_{N_2} = V_m \cdot \frac{m \cdot n_{N_2}}{\mu} = 22,4 \cdot \frac{1 \cdot 1,25 \cdot 3,76}{1} = 3,4 \text{ м}^3.$$

Входящие в состав горючего вещества азот и влага удаляются вместе с продуктами горения. Объем, который занимает при нормальных условиях 1 кг азота

$$V_{N_2} = V_m \cdot \frac{m}{\mu_{N_2}} = 22,4 \cdot \frac{1}{28} = 0,8 \text{ м}^3,$$

а 1 кг водяного пара

$$V_{H_2O} = V_m \cdot \frac{m}{\mu_{H_2O}} = 22,4 \cdot \frac{1}{18} = 1,24 \text{ м}^3.$$

Кислород в составе горючего вещества примет участие в горении, поэтому для полного сгорания данного вещества потребуется меньше кислорода из воздуха. Как следствие, в продуктах горения и азота будет

меньше на количество, приходящееся на данное количество кислорода.  
Объем азота, приходящийся на 1 кг кислорода

$$V_{N_2} = V_m \cdot \frac{m \cdot n_{N_2}}{\mu_{O_2}} = 22,4 \cdot \frac{3,76}{28} = 2,63 \text{ м}^3.$$

Соотношения горючих веществ и образующихся при их полном сгорании продуктов горения представлены в виде табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Объем продуктов горения ( $\text{м}^3$ ) на 1 кг вещества

Элемент	$\text{CO}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{SO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{N}_2$
Углерод	1,86				7,0
Водород		11,2			21,0
Сера			0,7		2,63
Фосфор				0,36	3,4
Азот в горючем веществе					0,8
Азот за счет кислорода					-2,63
Влага в горючем		1,24			

Согласно табл. 2.1, формулы для расчета объема продуктов горения произвольной массы  $m$  элементов вещества сложного состава имеют вид

$$V_{\text{CO}_2} = m \cdot \frac{1,86 \cdot \varphi_C}{100}; \quad (2.13)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = m \cdot \frac{11,2 \cdot \varphi_H + 1,24 \varphi_W}{100}; \quad (2.14)$$

$$V_{\text{SO}_2} = m \cdot \frac{0,7 \cdot \varphi_S}{100}; \quad (2.15)$$

$$V_{\text{N}_2} = m \cdot \frac{7,0 \varphi_C + 21,0 \varphi_H + 2,63 \varphi_S + 3,4 \varphi_P + 0,8 \varphi_N - 2,63 \varphi_O}{100}. \quad (2.16)$$

Общий объем продуктов горения  $V_{ng}$  определяется суммированием объемов всего образовавшихся продуктов горения. Объемная концентрация каждого компонента смеси определяется по формуле

$$\omega_{ng i} = \frac{V_{ng i}}{V_{ng}} \cdot 100\%. \quad (2.17)$$

### Вопросы для самоконтроля

1. Какой величиной характеризуется способность индивидуального вещества к горению? Какие значения может принимать данная характеристика?
2. Что принято называть веществами в конденсированном состоянии?
3. Как ведет себя в процессе горения кислород, содержащийся в горючем веществе сложного состава?
4. Какие продукты горения могут образовываться при полном сгорании веществ сложного состава?
5. При каком значении коэффициента избытка воздуха горючая смесь является стехиометрической?

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1**  
**«РЕАКЦИИ ГОРЕНИЯ И РАСХОД ВОЗДУХА НА ГОРЕНИЕ»**

Порядок составления реакций горения веществ в воздухе и определения теоретически необходимого количества воздуха:

*А) Индивидуальное вещество*

1. Составить левую часть реакции горения, добавив к горючему веществу кислород  $O_2$  и азот  $N_2$ , умноженный на коэффициент 3,76 при объемном задании смеси или на 3,29 – при массовом.

2. По формуле горючего вещества составить правую часть реакции горения, используя следующие правила:

<b>Элементы в составе горючего вещества</b>	<b>Продукты горения</b>
Углерод $C$	Углекислый газ $CO_2$
Водород $H$	Вода $H_2O$
Сера $S$	Оксид серы (IV) $SO_2$
Азот $N$	Молекулярный азот $N_2$
Фосфор $P$	Оксид фосфора (V) $P_2O_5$
Галогены $F, Cl, Br, I$	Галогеноводороды $HF, HCl, HBr, HI$

3. Добавить к продуктам горения азот  $N_2$  с соответствующим коэффициентом (3,76 или 3,29).

4. Уравнять число атомов каждого химического элемента путем домножения слагаемых на соответствующие коэффициенты в следующем порядке: углерод, водород, азот (если входит в состав горючего) и в завершении – кислород.

5. Коэффициент, получившийся в результате уравнивания числа атомов перед слагаемым  $O_2$  в левой части, умножается на коэффициент перед свободным азотом (3,76 или 3,29) в левой и правой части.

6. Определить теоретически необходимого объема воздуха при нормальных условиях горения по формуле (2.2) или (2.3).

7. В случае, когда условия горения отличаются от нормальных, при окончательном определении теоретически необходимого объема воздуха следует использовать формулу (2.6).

**Пример 1**

Составить реакцию горения 1 м<sup>3</sup> изопропилового спирта  $C_3H_7OH$  в воздухе и определить теоретические массу и объем воздуха, необходимые для его горения при температуре 20°C и давлении 98 000 Па.

*Решение*

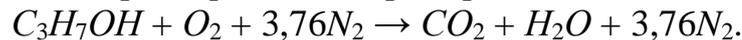
Поскольку количество горючего вещества задано в единицах объема, то объемное соотношение азота и кислорода в воздухе составляет

$$\frac{\varphi_{N_2}}{\varphi_{O_2}} = \frac{79}{21} = 3,76.$$

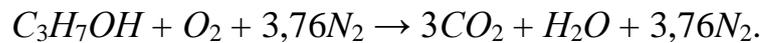
В начале горения присутствует горючее вещество, кислород и азот, поэтому левая часть реакции имеет вид



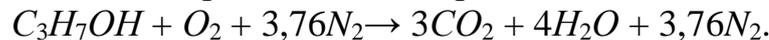
Согласно п. 2 порядка составления реакций горения индивидуальных веществ в воздухе углерод  $C$  переходит в углекислый газ  $CO_2$ , водород  $H$  – в воду  $H_2O$ , а количество свободного азота остается неизменным. В результате, правая часть реакции предварительно приобретает вид



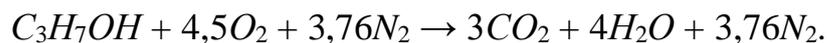
Уравниваем количество атомов каждого химического элемента, начиная с углерода. Здесь первое слагаемое в правой части необходимо домножить на 3



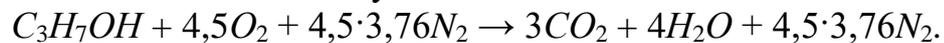
Следующим элементом является водород: в левой части 8 атомов, тогда как в правой – 2. Домножаем второе слагаемое правой части на 4



В левой части 3 атома кислорода, а в правой – 10. Умножаем на 4,5 второе слагаемое левой части



Для сохранения объемного состава воздуха умножаем на 4,5 последнее слагаемое в левой части, а для того, чтобы не нарушался закон сохранения вещества – на этот же коэффициент умножаем и последнее слагаемое в правой части. Окончательно получаем



Реакция горения составлена.

Изопропиловый спирт  $C_3H_7OH$  является индивидуальным химическим соединением, поэтому для расчета теоретического объема воздуха используем формулу (2.1)

$$V_{e0} = \frac{n_{O_2} + n_{N_2}}{n_z}.$$

Из уравнения горения изопропилового спирта находим  $n_{O_2} = 4,5$ ;  $n_{N_2} = 4,5 \cdot 3,76 = 16,9$ ;  $n_z = 1$ . Тогда теоретически необходимый объем воздуха

$$V_{e0} = \frac{4,5 + 16,9}{1} = 21,4 \text{ м}^3.$$

Массу воздуха, соответствующую теоретически необходимому объему, определяем по формуле

$$m_e = V_{e0} \rho_e = V_e \cdot \frac{\varphi_{N_2} \mu_{N_2} + \varphi_{O_2} \mu_{O_2}}{22,4} = 21,4 \cdot \frac{0,79 \cdot 28 + 0,21 \cdot 32}{22,4} = 21,7 \text{ кг}.$$

Горение изопропилового спирта происходит в условиях, отличных от нормальных, поэтому нужно перевести температуру горючего вещества в систему СИ

$$T = t + 273 = 293 \text{ К}.$$

Далее находим теоретический объем воздуха при заданных условиях

$$V_{\epsilon} = V_{\epsilon 0} \cdot \frac{P_0 \cdot T}{T_0 \cdot P} = 21,4 \cdot \frac{101\,325 \cdot 293}{273 \cdot 98\,000} = 23,8 \text{ м}^3.$$

Задача решена.

### *Б) Вещество сложного состава*

Порядок определения теоретического объема воздуха, необходимого для полного сгорания вещества сложного состава:

1. Составить реакции горения для каждого горючего компонента сложного вещества (углерода, водорода и серы). При построении реакций горения использовать правила, приведенные для индивидуальных веществ.

2. Определить количество кислорода, необходимое для полного сгорания каждого горючего компонента сложного вещества.

3. По формуле (2.4) определить теоретически необходимое количество воздуха.

4. В случае, когда условия горения отличаются от нормальных, при окончательном определении теоретически необходимого объема воздуха следует использовать формулу (2.6).

### **Пример 2**

Определить объем воздуха, необходимый для полного сгорания при нормальных условиях 5 кг торфа, состоящего из 40,0% углерода, 4,0% водорода, 13,0% кислорода и 20,0% азота. Содержание золы  $A = 10\%$ ; содержание влаги  $W = 13,0\%$ .

### *Решение*

Реакции горения горючих составляющих торфа имеют вид:

1.  $C + O_2 \rightarrow CO_2$ .  $12 + 32 = 44$ , то есть для сгорания 12 кг  $C$  необходимо 32 кг  $O_2$ .
2.  $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ .  $4 + 32 = 36$ , то есть для сгорания 4 кг  $H$  необходимо 32 кг  $O_2$ .
3.  $S + O_2 \rightarrow SO_2$ .  $32 + 32 = 64$ , то есть для сгорания 32 кг  $S$  необходимо 32 кг  $O_2$ .

Объем воздуха, теоретически необходимый для сгорания 1 кг торфа, определяется по формуле (2.3)

$$V_{\epsilon 0} = 0,269 \cdot \left( \frac{[C]}{3} + [H] + \frac{[S]}{8} - \frac{[O]}{8} \right).$$

Тогда для 5 кг торфа имеем

$$V_{\epsilon} = 5 \cdot 0,269 \cdot \left( \frac{[C]}{3} + [H] + \frac{[S]}{8} - \frac{[O]}{8} \right) = 5 \cdot 0,269 \cdot \left( \frac{40}{3} + 4 - \frac{13}{8} \right) = 21,5 \text{ м}^3.$$

Задача решена.

### *В) Смесь газов*

Порядок определения теоретического объема воздуха, необходимого для полного сгорания смеси газов:

1. Записать реакции горения отдельно для каждого компонента горючей смеси газов.

2. Полученные значения просуммировать, умножив при этом каждое слагаемое на объемную долю соответствующего компонента, измеряемую в процентах.

3. Объем воздуха, теоретически необходимый для полного сгорания смеси газов, определить по формуле (2.5).

4. При расчете объема воздуха  $V_{\epsilon}$ , расходуемого на сгорание произвольного объема смеси газов, рассчитанное по формуле (2.5) значение необходимо умножить на заданный объем смеси.

5. Если условия горения отличаются от нормальных, то при окончательном определении теоретически необходимого объема воздуха следует использовать формулу (2.6).

### Пример 3

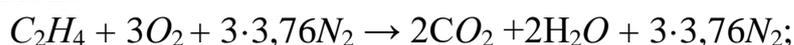
Определить количество воздуха, необходимое для полного сгорания смеси газов, имеющей следующий состав: этилен  $C_2H_4$  – 45%, угарный газ  $CO$  – 25%, углекислый газ  $CO_2$  – 23%, азот  $N_2$  – 7%. Объем горючей смеси  $V_2 = 30 \text{ м}^3$ , температура окружающей среды  $t_{амм} = 25^\circ\text{C}$ , атмосферное давление  $P_{амм} = 99\,500 \text{ Па}$ . Свободный объем помещения  $V_{ном} = 400 \text{ м}^3$ .

#### Решение

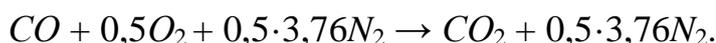
В данной смеси газов горючими компонентами являются этилен  $C_2H_4$  и угарный газ  $CO$ . Углекислый газ  $CO_2$  и азот  $N_2$  в воздушной среде являются негорючими газами и, следовательно, на расход воздуха при горении смеси не влияют.

Реакции полного горения горючих компонентов смеси имеют вид:

- для этилена



- для угарного газа



Рассчитываем теоретически необходимый для полного сгорания  $1 \text{ м}^3$  смеси объема воздуха

$$V_{\epsilon 0} = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{n_{iO_2}}{n_{i\epsilon}} \cdot \varphi_i - \varphi_{O_2}}{21} = \frac{\frac{3}{1} \cdot 45\% + \frac{0,5}{1} \cdot 25\% - 0}{21} = 7,0 \text{ м}^3.$$

Тогда теоретически необходимый объема воздуха для сгорания  $V_2 = 30 \text{ м}^3$  данной горючей смеси при нормальных условиях составит

$$V_{\epsilon 1} = V_{\epsilon 0} \cdot V_2 = 7,0 \cdot 30 = 210 \text{ м}^3.$$

Поскольку условия в задаче отличаются от нормальных, то окончательный объем воздуха находим по формуле

$$V_{\epsilon} = V_{\epsilon 1} \cdot \frac{101325 \cdot T}{273 \cdot P} = 210 \cdot \frac{101325 \cdot (273 + 25)}{273 \cdot 99500} = 233,4 \text{ м}^3.$$

Задача решена.

### Задание к самостоятельной работе № 1

Рассчитать теоретический объем и массу воздуха, необходимые для горения 1 м<sup>3</sup> заданного горючего вещества. Расчетные данные взять из табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Исходные данные к самостоятельной работе 1

№ варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Условия горения
1	2	3	4
1	Метиловый спирт	$CH_3OH$	$T = 290 \text{ К};$ $P = 90\,000 \text{ Па}$
	Сложное вещество	$C - 60\%, O - 20\%,$ $H - 5\%, S - 10\%$	
	Доменный газ	$CO - 24\%, H_2 - 4\%,$ $CO_2 - 20\%, CH_4 - 2\%,$ $N_2 - 50\%$	
2	Анилин	$C_6H_7N$	$T = 292 \text{ К};$ $P = 97\,000 \text{ Па}$
	Сложное вещество	$C - 90\%, O - 2\%,$ $H - 3\%, N - 5\%$	
	Водяной газ	$CO - 10\%, H_2 - 40\%,$ $CO_2 - 10\%, CH_4 - 5\%,$ $N_2 - 35\%$	
3	Муравьиная кислота	$CH_2O_2$	$T = 285 \text{ К};$ $P = 95\,500 \text{ Па}$
	Сложное вещество	$C - 82\%, O - 6\%,$ $H - 8\%, N - 4\%$	
	Природный газ	$C_2H_6 - 2\%, H_2 - 4\%,$ $C_4H_{10} - 4\%, CH_4 -$ $86\%, C_3H_8 - 4\%$	
4	Бутиловый спирт	$C_4H_9OH$	$T = 302 \text{ К};$ $P = 80\,000 \text{ Па}$
	Сложное вещество	$C - 60\%, O - 13\%,$ $H - 15\%, N - 12\%$	
	Светильный газ	$CO - 10\%, H_2 - 50\%,$ $CO_2 - 3\%, CH_4 - 30\%,$ $N_2 - 7\%$	
5	Метилэтилкетон	$C_4H_8O$	$T = 283 \text{ К};$ $P = 93\,400 \text{ Па}$
	Сложное вещество	$C - 70\%, O - 20\%,$ $H - 6\%, S - 4\%$	
	Коксовый газ	$CO - 10\%, H_2 - 54\%,$ $CO_2 - 2\%, CH_4 - 22\%,$ $N_2 - 12\%$	
6	Глицерин	$C_3H_8O_3$	$T = 303 \text{ К};$ $P = 93\,300 \text{ Па}$
	Сложное вещество	$C - 65\%, O - 15\%,$ $H - 6\%, S - 14\%.$	
	Попутный нефтяной газ	$CH_4 - 42\%, N_2 - 8\%,$ $C_2H_6 - 20\%, C_3H_8 -$ $20\%, C_4H_{10} - 10\%$	

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
7	Этиловый спирт	$C_2H_5OH$	$T = 290 \text{ К};$ $P = 90\,000 \text{ Па}$
	Сложное вещество	$C - 40\%, O - 30\%,$ $N - 10\%, H - 20\%$	
	Смесь газов	$CO - 30\%, H_2 - 15\%,$ $CO_2 - 10\%, CH_4 - 5\%,$ $N_2 - 40\%$	
8	Сероуглерод	$CS_2$	$T = 400 \text{ К};$ $P = 100\,000 \text{ Па}$
	Сложное вещество	$C - 70\%, O - 15\%,$ $N - 10\%, H - 5\%$	
	Смесь газов	$CO - 45\%, H_2 - 15\%,$ $Cl - 40\%$	
9	Глюкоза	$C_6H_{12}O_6$	$T = 500 \text{ К};$ $P = 120\,000 \text{ Па}$
	Сложное вещество	$C - 70\%, Cl - 15\%,$ $N - 10\%, H - 5\%$	
	Смесь газов	$CO - 35\%, CH_4 -$ $40\%, C_2H_6 - 25\%$	
10	Анилин	$C_6H_5NH_2$	$T = 290 \text{ К};$ $P = 95\,000 \text{ Па}$
	Сложное вещество	$S - 70\%, Cl - 15\%,$ $N - 10\%, F - 5\%$	
	Смесь газов	$CO - 30\%, H_2 - 10\%,$ $CH_4 - 20\%, N_2 - 40\%$	
11	Хлорметан	$CH_3Cl$	$T = 350 \text{ К};$ $P = 99\,000 \text{ Па}$
	Сложное вещество	$C - 60\%, H - 25\%,$ $N - 9\%, F - 6\%$	
	Смесь газов	$CH_4 - 40\%, O_2 - 60\%$	
12	Глицин	$C_2H_5NO_2$	$T = 300 \text{ К};$ $P = 96\,500 \text{ Па}$
	Сложное вещество	$H - 70\%, O - 15\%,$ $N - 10\%, F - 5\%$	
	Смесь газов	$CO - 30\%, CH_4 - 70\%$	
13	Кетен	$CH_2CO$	$T = 290 \text{ К};$ $P = 100\,200 \text{ Па}$
	Сложное вещество	$C - 70\%, O - 15\%,$ $N - 10\%, Cl - 5\%$	
	Смесь газов	$CO - 30\%, CH_4 -$ $30\%, C_2N_6 - 40\%$	
14	Лимонная кислота	$C_6H_8O_7$	$T = 295 \text{ К};$ $P = 99\,500 \text{ Па}$
	Сложное вещество	$S - 70\%, N - 15\%,$ $H - 10\%, O - 5\%$	
	Смесь газов	$CH_4 - 20\%, H_2 - 80\%$	
15	Фенол	$C_6H_5OH$	$T = 293 \text{ К};$ $P = 106\,400 \text{ Па}$
	Сложное вещество	$C - 70\%, O - 15\%,$ $H - 10\%, F - 5\%$	
	Смесь газов	$CO_2 - 30\%, CH_4 -$ $20\%, C_2N_6 - 50\%$	

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2  
«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА И ПРОЦЕНТНОГО СОСТАВА ПРОДУКТОВ  
ГОРЕНИЯ»

*А) Индивидуальное вещество*

Выход продуктов сгорания количественно установить невозможно, поэтому предполагается, что горючее вещество полностью сгорает до конечных продуктов.

Порядок расчета объема и состава продуктов сгорания индивидуального вещества:

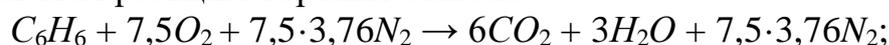
1. Составить реакцию горения данного вещества.
2. Рассчитать объем, который занимает 1 кмоль газа при заданных условиях.
3. Определить теоретический объем продуктов горения.
4. Рассчитать избыток воздуха (если он задан).
5. Определить объем компонентов продуктов горения.
6. Определить процентный состав компонентов продуктов горения.

**Пример 1**

Определить объем и состав продуктов горения, образовавшихся при сгорании 2 кг бензола  $C_6H_6$  при температуре  $20^\circ C$  и давлении 110 000 Па. Коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,4$ .

*Решение*

Составляем реакцию горения бензола



Молярная масса бензола

$$\mu = 12 \cdot 6 + 1 \cdot 6 = 78 \text{ кг/моль.}$$

Определяем объем, занимаемый 1 кмолем газа при заданных условиях

$$V_m = 22,4 \cdot \frac{P_0 \cdot T}{T_0 \cdot P} = 22,4 \cdot \frac{101325 \cdot (273 + 20)}{273 \cdot 110000} = 22,1 \text{ м}^3.$$

Теоретический объем продуктов горения

$$V_{\text{ПГ}} = V_m \cdot \frac{m \cdot \sum_{i=1}^k n_i}{\mu} = 22,1 \cdot \frac{2 \cdot (6 + 3 + 7,5 \cdot 3,76)}{78} = 21,1 \text{ м}^3.$$

Горение протекает с избытком воздуха, поэтому избыточный воздух должен войти в состав продуктов горения. Для его определения сначала необходимо найти количество воздуха, необходимого для полного сгорания 2 кг бензола

$$V_{e0} = V_m \cdot \frac{m \cdot (n_{O_2} + n_{N_2})}{\mu} = 22,1 \cdot \frac{2 \cdot 7,5 \cdot (1 + 3,76)}{78} = 20,2 \text{ м}^3.$$

Избыток воздуха определяем по формуле

$$\Delta V_e = V_{e0} \cdot (\alpha - 1) = 20,2 \cdot (1,4 - 1) = 8,1 \text{ м}^3.$$

Окончательно объем продуктов горения

$$V_{\text{ПГ}}^* = V_{\text{ПГ}} + \Delta V_{\text{в}} = 21,1 + 8,1 = 29,1 \text{ м}^3.$$

Определяем объем продуктов горения – углекислого газа, воды и азота

$$V_{\text{CO}_2} = V_{\text{м}} \cdot \frac{m \cdot n_{\text{CO}_2}}{\mu} = 22,1 \cdot \frac{2 \cdot 6}{78} = 3,4 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{м}} \cdot \frac{m \cdot n_{\text{H}_2\text{O}}}{\mu} = 22,1 \cdot \frac{2 \cdot 3}{78} = 1,7 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{N}_2} = V_{\text{м}} \cdot \frac{m \cdot n_{\text{N}_2}}{\mu} = 22,1 \cdot \frac{2 \cdot 7,5 \cdot 3,76}{78} = 15,9 \text{ м}^3.$$

$$\Delta V_{\text{в}} = 8,1 \text{ м}^3.$$

Объемная концентрация каждого компонента смеси определяется по формуле

$$\varphi_{\text{CO}_2} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{ПГ}}^*} \cdot 100\% = \frac{3,4}{29,1} \cdot 100\% = 11,7\% ;$$

$$\varphi_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{ПГ}}^*} \cdot 100\% = \frac{1,7}{29,1} \cdot 100\% = 5,8\% ;$$

$$\varphi_{\text{N}_2} = \frac{V_{\text{N}_2}}{V_{\text{ПГ}}^*} \cdot 100\% = \frac{15,9}{29,1} \cdot 100\% = 54,6\% .$$

Задача решена.

### Б) Вещество сложного состава

Порядок расчета объема и состава продуктов сгорания вещества сложного состава:

1. По формулам (2.12)–(2.15) определить объемы всех образовавшихся продуктов сгорания.
2. Определить суммарный объем продуктов сгорания.
3. По формуле (2.3) определить теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания данного вещества и рассчитать избыток воздуха (если он задан).
5. Найти практический объем компонентов продуктов горения.
6. Определить процентный состав компонентов продуктов горения по формуле (2.16).

### Пример 2

Определить объем и процентный состав продуктов горения 2 кг угля, имеющего следующий состав:  $C - 75\%$ ,  $H - 4\%$ ,  $O - 3\%$ ,  $S - 2\%$ ,  $N - 1\%$ ,  $W - 4\%$ , зола  $A - 11\%$ . Условия горения нормальные, горение протекает с избытком воздуха ( $\alpha = 1,5$ ).

#### Решение

Определяем объем каждого компонента продуктов горения

$$V_{\text{CO}_2} = m \cdot \frac{1,86 \cdot \varphi_C}{100} = 2 \cdot \frac{1,86 \cdot 75}{100} = 2,8 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = m \cdot \frac{11,2 \cdot \varphi_H + 1,24 \varphi_W}{100} = 2 \cdot \frac{11,2 \cdot 4 + 1,24 \cdot 4}{100} = 1,0 \text{ м}^3;$$

$$V_{SO_2} = m \cdot \frac{0,7 \cdot \varphi_S}{100} = 2 \cdot \frac{0,7 \cdot 2}{100} = 0,03 \text{ м}^3;$$

$$V_{N_2} = m \cdot \frac{7,0\varphi_C + 21,0\varphi_H + 2,63\varphi_S + 3,4\varphi_P + 0,8\varphi_N - 2,63\varphi_O}{100} =$$

$$= 2 \cdot \frac{7,0 \cdot 75 + 21,0 \cdot 4 + 2,63 \cdot 2 + 0,8 \cdot 1 - 2,63 \cdot 3}{100} = 12,1 \text{ м}^3.$$

Объем продуктов горения

$$V_{\text{ПГ}} = 2,8 + 1,0 + 0,03 + 12,1 = 15,93 \text{ м}^3.$$

Находим теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания 2 кг угля

$$V_{\text{в0}} = 0,269m \cdot \left( \frac{[C]}{3} + [H] + \frac{[S]}{8} - \frac{[O]}{8} \right) = 0,269 \cdot 2 \cdot \left( \frac{75}{3} + 4 + \frac{2-3}{8} \right) = 15,5 \text{ м}^3.$$

Избыток воздуха находим по формуле

$$\Delta V_{\text{в}} = V_{\text{в0}}(\alpha - 1) = 15,5 \cdot (1,5 - 1) = 7,7 \text{ м}^3.$$

Практический объем продуктов горения

$$V_{\text{прак}} = V_{\text{ПГ}} + \Delta V_{\text{в}} = 15,93 + 7,7 = 23,63 \text{ м}^3.$$

Определяем процентный состав продуктов горения

$$\varphi_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{\text{прак}}} \cdot 100\% = \frac{2,8}{23,63} \cdot 100\% = 11,8\%;$$

$$\varphi_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{\text{прак}}} \cdot 100\% = \frac{1,0}{23,63} \cdot 100\% = 4,2\%;$$

$$\varphi_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{\text{прак}}} \cdot 100\% = \frac{0,03}{23,63} \cdot 100\% = 0,2\%$$

$$\varphi_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{\text{прак}}} \cdot 100\% = \frac{12,1}{23,63} \cdot 100\% = 51,2\%;$$

$$\varphi_{\Delta V} = \frac{V_{\Delta V}}{V_{\text{прак}}} \cdot 100\% = \frac{7,7}{23,63} \cdot 100\% = 32,6\%.$$

Задача решена.

### В) Смесь газов

Порядок расчета объема и состава продуктов сгорания смеси газов:

1. Составить реакции горения для каждого горючего газа, входящего в данную смесь.
2. Рассчитать объем продуктов горения, выделяющихся при сгорании 1 м<sup>3</sup> каждого горючего газа смеси.
3. Зная процентное содержание каждого горючего газа (в объемных процентах), определить суммарный объем образовавшихся продуктов горения.
4. Если горение происходит с избытком воздуха, рассчитать избыток воздуха и включить его в продукты горения.
5. Определить процентный состав компонентов продуктов горения.

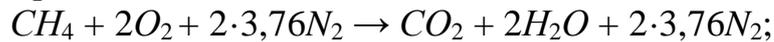
### Пример 3

Определить объем и состав продуктов горения 2 м<sup>3</sup> природного газа, имеющего следующий объемный состав: метан CH<sub>4</sub> – 75%, этан C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> – 4%, пропан C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> – 2%, углекислый газ CO<sub>2</sub> – 19%. Горение протекает с избытком воздуха ( $\alpha = 1,4$ ).

#### Решение

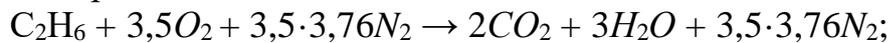
Горючими компонентами природного газа являются метан, этан и пропан. Составляем для них реакции горения.

Реакция горения метана



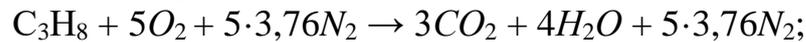
При сгорании 1 м<sup>3</sup> метана образуется 1 м<sup>3</sup> углекислого газа, 2 м<sup>3</sup> воды и 2·3,76 м<sup>3</sup> азота.

Реакция горения этана



При сгорании 1 м<sup>3</sup> этана образуется 2 м<sup>3</sup> углекислого газа, 3 м<sup>3</sup> воды и 3,5·3,76 м<sup>3</sup> азота.

Реакция горения пропана



При сгорании 1 м<sup>3</sup> пропана образуется 3 м<sup>3</sup> углекислого газа, 4 м<sup>3</sup> воды и 5·3,76 м<sup>3</sup> азота.

Определяем объем продуктов горения (углекислого газа, воды и азота), образовавшихся при сгорании смеси газов.

### Задание к самостоятельной работе № 2

Рассчитать объем образующихся продуктов горения (в м<sup>3</sup>) и объемную долю каждого из компонентов (в %). Коэффициент избытка воздуха (при горении смеси газов)  $\alpha = 1,4$ . Расчетные данные взять из табл. 2.2

Таблица 2.2 – Исходные данные к самостоятельной работе 2

Вариант	Вещество	Масса, кг	Условия горения
1	2	3	4
1	Диэтиловый эфир (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> O	2	T = 1480 К, P = 103 300 Па
	Смесь газов: CH <sub>4</sub> – 20%, C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> – 30%, O <sub>2</sub> – 15%, CO <sub>2</sub> – 35%		
	Сложное вещество: C – 70%, O – 15%, H – 10%, P – 5%		
2	Октиловый спирт C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	2,5	T = 450 К P = 90 300 Па
	Смесь газов: CH <sub>4</sub> – 30%, C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> – 20%, N <sub>2</sub> – 15%, CO – 35%		
	Сложное вещество: S – 70%, N – 15%, H – 10%, O – 5%		

1	2	3	4
3	Анилин $C_6H_7N$	3	$T = 400$ К $P = 100\ 000$ Па
	Смесь газов: $C_3H_8 - 25\%$ , $O_2 - 5\%$ , $CO_2 - 70\%$		
	Сложное вещество: $H - 70\%$ , $O - 15\%$ , $N - 10\%$ , $P - 5\%$		
4	Нитробензол $C_6H_5NO_2$	3,5	$T = 290$ К $P = 101\ 200$ Па
	Смесь газов: $CH_4 - 60\%$ , $H_2 - 10\%$ , $CO_2 - 30\%$		
	Сложное вещество: $S - 60\%$ , $H - 25\%$ , $N - 9\%$ , $P - 6\%$		
5	Диметиловый эфир $(CH_3)_2O$	4	$T = 300$ К $P = 99\ 200$ Па
	Смесь газов: $CH_4 - 20\%$ , $C_3H_8 - 30\%$ , $N_2 - 15\%$ , $CO - 35\%$		
	Сложное вещество: $C - 70\%$ , $O - 15\%$ , $N - 10\%$ , $H - 5\%$		
6	Нитротолуол $C_7H_7NO_2$	4,5	$T = 330$ К $P = 115\ 200$ Па
	Смесь газов: $CH_3 - 40\%$ , $O_2 - 30\%$ , $CO_2 - 30\%$		
	Сложное вещество: $C - 40\%$ , $O - 30\%$ , $N - 10\%$ , $H - 20\%$		
7	Этилацетат $C_4H_8O_2$	5	$T = 250$ К $P = 100\ 300$ Па
	Смесь газов: $CH_3 - 40\%$ , $C_6H_6 - 35\%$ , $CO - 25\%$		
	Сложное вещество: $C - 70\%$ , $O - 20\%$ , $H - 6\%$ , $S - 4\%$		
8	Ацетон $C_3H_6O$	2,7	$T = 285$ К $P = 105\ 300$ Па
	Смесь газов: $CH_4 - 30\%$ , $C_2H_6 - 20\%$ , $C_3H_8 - 50\%$		
	Сложное вещество: $C - 60\%$ , $O - 25\%$ , $H - 10\%$ , $S - 5\%$		
9	Винилхлорид $C_2H_3Cl$	5,2	$T = 295$ К $P = 105\ 000$ Па
	Смесь газов: $CH_4 - 50\%$ , $CH_2 - 30\%$ , $CO - 20\%$		
	Сложное вещество: $C - 70\%$ , $S - 5\%$ , $H - 5\%$ , $O - 20\%$		
10	Диэтиламин $C_4H_{11}N$	5,0	$T = 300$ К $P = 103\ 300$ Па
	Смесь газов: $C_2H_6 - 25\%$ , $SO_2 - 5\%$ , $CO_2 - 70\%$		
	Сложное вещество: $C - 70\%$ , $N - 5\%$ , $H - 5\%$ , $O - 20\%$		

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
11	Метилэтилкетон $C_4H_8O$	4,0	$T = 373 \text{ К}$ $P = 93\,300 \text{ Па}$
	Смесь газов: $CH_4 - 25\%$ , $CO - 60\%$ , $CO_2 - 15\%$		
	Сложное вещество: $C - 50\%$ , $N - 25\%$ , $H - 15\%$ , $O - 10\%$		
12	Фталевый ангидрид $C_8H_4O$	4,5	$T = 383 \text{ К}$ $P = 95\,500 \text{ Па}$
	Смесь газов: $CH_4 - 25\%$ , $CO - 60\%$ , $HCl - 15\%$		
	Сложное вещество: $C - 50\%$ , $Cl - 25\%$ , $H - 15\%$ , $P - 10\%$		
13	Этиленгликоль $C_2H_5O_2$	4,4	$T = 396 \text{ К}$ $P = 96\,700 \text{ Па}$
	Смесь газов: $CH_4 - 50\%$ , $C_2H_6 - 40\%$ , $SO_2 - 10\%$		
	Сложное вещество: $N - 50\%$ , $C - 30\%$ , $H - 10\%$ , $P - 10\%$		
14	Формальдегид $CH_2O$	2,5	$T = 300 \text{ К}$ $P = 100\,100 \text{ Па}$
	Смесь газов: $CH_4 - 50\%$ , $C_2H_6 - 30\%$ , $CO_2 - 20\%$		
	Сложное вещество: $C - 40\%$ , $O - 30\%$ , $H - 20\%$ , $N - 10\%$		
15	Хлорэтан $C_2H_5Cl$	3,5	$T = 293 \text{ К}$ $P = 90\,000 \text{ Па}$
	Смесь газов: $CH_4 - 50\%$ , $C_2H_6 - 30\%$ , $C_3H_8 - 20\%$		
	Сложное вещество: $C - 35\%$ , $Cl - 35\%$ , $P - 20\%$ , $N - 10\%$		

## РАЗДЕЛ 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

### 3.1 Классификация и характеристика пожароопасных веществ

*Пожаровзрывоопасность веществ и материалов* – совокупность свойств, характеризующих способность материалов к возникновению и распространению горения. Все материалы при определении пожаровзрывоопасности принято делить на:

- *газы* – вещества, давление насыщенных паров которых при температуре 25°C и давлении 101,3 кПа превышает 101,3 кПа;
- *жидкости* – вещества, давление насыщенных паров которых при температуре 25°C и давлении 101,3 кПа меньше 101,3 кПа. К жидкостям также относятся металлы с температурой плавления не более 50°C;
- *твердые вещества и материалы* – индивидуальные вещества и их смесевые композиции с температурой плавления больше 50°C, а также вещества не имеющие температуры плавления (например, древесина, ткани);
- *пыли* – дисперсированные твердые вещества и материалы с размером частиц менее 850 мкм.

Основные характеристики пожаровзрывоопасности материалов:

1. *Температура вспышки* – наименьшая температура конденсированного вещества, при которой над его поверхностью образуются пары, способные вспыхнуть на воздухе от источника зажигания.

2. *Температура воспламенения* – наименьшая температура вещества, при которой в условиях специальных испытаний вещество выделяет горючие пары и газы с такой скоростью, что при воздействии на них источника зажигания наблюдается воспламенение.

3. *Температура самовоспламенения* – наименьшая температура окружающей среды, при которой в условиях специальных испытаний наблюдается самовоспламенение вещества.

4. *Температура тления* – температура вещества, при которой происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций окисления, заканчивающихся возникновением тления

5. *Горючесть* – способность вещества и материалов к горению. По способности к горению или по горючести вещества и материалы подразделяются на три группы: негорючие, трудногорючие и горючие. При этом все горючие вещества принято разделять на легковоспламеняющиеся, вещества средней воспламеняемости и трудновоспламеняющиеся.

*Легковоспламеняющиеся* – горючие вещества повышенной пожарной опасности, способные без предварительного подогрева возгораться при кратковременном (до 30 с) воздействии источника зажигания с низкой энергией (от пламени спички, искры, сигареты и др.).

Наиболее распространенным классом легковоспламеняющихся веществ являются легковоспламеняющиеся жидкости (ЛВЖ) – горючие жидкости с температурой вспышки не более 61°C. Их принято делить на следующие подклассы:

- *особо опасные* – горючие жидкости с температурой вспышки не более 18°C, такие как бензин, ацетон C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O, диэтиловый эфир C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O и т.д.;

- *постоянно опасные* – горючие жидкости с температурой вспышки от 18 до 23°C, такие как этиловый спирт, диоксан C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>O<sub>2</sub> и т.д.;

- *опасные при повышенной температуре* – горючие жидкости с температурой вспышки от 23 до 61°C, такие как уайт-спирит, керосин, скипидар и т.д.

Легковоспламеняющиеся твердые вещества – целлулоид, полистирол, древесная стружка – возгораются от пламени спички, спиртовки, газовой горелки.

**Вещества средней воспламеняемости** – древесина, уголь, бумага в пачках, ткань в рулонах. Для них необходим источник зажигания с высокой энергией, способной прогреть до температуры воспламенения.

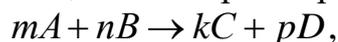
**Трудновоспламеняющиеся вещества** – мочевины (карбамид) CH<sub>4</sub>ON<sub>2</sub>, гетинакс, древесина после огнезащитной обработки, ПВХ.

Дополнительными показателями пожаровзрывоопасности веществ являются:

6. *Кислородный индекс* – минимальное содержание кислорода в кислородно-азотной смеси, при котором возможно свечеобразное горение материала.

7. *Коэффициент дымообразования* – показатель, характеризующий оптическую плотность дыма, образующегося при пламенном горении или тлении определенного количества твердого вещества.

8. *Скорость горения* – количество жидкости, сгорающей в единицу времени с единицы площади. Зависимость скорости химической реакции от концентраций реагирующих веществ выражается **законом масс**: скорость химической реакции прямо пропорциональна произведению молекулярных концентраций реагирующих веществ. Скорость реакции горения



определяется формулой

$$v = k \cdot [A]^m \cdot [B]^n, \quad (3.1)$$

где  $m$  и  $n$  – стехиометрические коэффициенты при компонентах горючей смеси;  $[A]$  и  $[B]$  – концентрации горючего и окислителя, соответственно;  $k$  – константа скорости данной химической реакции.

Скорость реакции горения не является постоянной, а зависит от ряда внешних факторов. Зависимость скорости реакции от температуры веществ, вступающих в реакцию, выражается правилом Ван-Гоффа: повышение температуры веществ на 10°C приводит к увеличению скорости реакции в 2 – 4 раза

$$\frac{v_2}{v_1} = \gamma^{\frac{t_2 - t_1}{10}}, \quad (3.2)$$

где  $\gamma = 2 \dots 4$  – температурный коэффициент реакции.

### 3.2 Самовозгорание, его виды

Самовозгорание веществ и материалов – горение, возникающее при отсутствии внешнего источника зажигания. В зависимости от внутреннего импульса процессы самовозгорания можно условно разделить на химические, микробиологические и тепловые.

**1. Химическое самовозгорание** – происходит за счет увеличения скорости химической реакции с возрастанием температуры. Недостаточный теплоотвод способствует нагреву материала в результате окислительных процессов и соответственно достижению критических условий возникновения горения.

Классификация самовозгорающихся химических веществ:

- *вещества, самовозгорающиеся при взаимодействии с воздухом* – щелочные металлы (литий, калий, натрий, рубидий, цезий), их сульфиды, минеральные масла;

- *вещества, самовозгорающиеся при взаимодействии с водой* – щелочные металлы, их карбиды. Образующегося при этом тепла достаточно для воспламенения образующихся газов ( $H_2$ ,  $C_2H_2$ ,  $CH_4$ , пропан  $C_3H_8$ );

- *вещества, самовозгорающиеся при взаимодействии друг с другом* – сильные окислители, такие как серная или азотная кислота.

**2. Микробиологическое самовозгорание** – происходит при соответствующей влажности и температуре в продуктах растительного происхождения. Особенно склонны к самовозгоранию недосушенные материалы (сено, опилки, листья, хлопок и т.д.), так как влага и тепло способствуют активному размножению микроорганизмов (уже при температуре  $10...18^\circ C$ ). К разогреву также приводит низкая теплопроводность растительных продуктов. При  $t \geq 75^\circ C$  микроорганизмы, как правило, погибают, но некоторые органические вещества обугливаются. Для предотвращения самовозгорания осуществляют регулярный контроль температуры, ограничивают влажность и размеры штабелей.

**3. Тепловое самовозгорание** присуще дисперсным веществам, обладающим сильно развитой поверхностью, способным адсорбировать кислород и вступать с ним в реакцию (ископаемые угли). Самовозгоранию углей способствует их измельченность, а также наличие примесей пирита и влаги. Температура  $60^\circ C$  считается критической для самовозгорания углей, так как при дальнейшем нагреве резко увеличивается скорость самовозгорания.

*Самовоспламенение* – самовозгорание, сопровождающееся появлением пламени. Температура самовоспламенения не является физической константой горючих веществ, а зависит от множества факторов: размера и формы емкости, содержащей вещество; химических свойств горючего и его окислительной способности концентрации реагирующих веществ и теплофизических свойств горючей смеси.

Способность горючего вещества (смеси) к самовоспламенению определяется конкретными условиями образования теплоты и ее рассеяния в

окружающую среду. Для горючей смеси, содержащейся в герметичном объеме  $V$ , выделяющаяся теплота будет равна

$$q_+ = Q_{гор} \cdot \nu \cdot V, \quad (3.3)$$

где  $Q_{гор}$  – тепловой эффект реакции, кДж/моль.

Если температура горючего вещества выше температуры стенок емкости, то возникает тепловой поток от более нагретого тела к менее нагретому. Его величина

$$q_- = \alpha(T - T_0) \cdot S, \quad (3.4)$$

где  $T$  и  $T_0$  – температура смеси и стенок емкости, °С;  $S$  – площадь внутренней поверхности стенок емкости, м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, кДж/м<sup>2</sup>.

Условием самовоспламенения веществ и смесей является превышение тепловыделения над теплоотводом

$$q_+ \geq q_-, \quad \frac{dq_+}{dt} \geq \frac{dq_-}{dt}. \quad (3.5)$$

Отношение площади стенок к объему  $S/V$  называется *удельной поверхностью*, эта величина существенно влияет на теплоотвод: увеличение удельной поверхности ведет к повышению температуры самовоспламенения.

### Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение самовозгоранию и самовоспламенению. В чем различие между этими явлениями?
2. В каких случаях горение материалов происходит без образования пламени?
3. Какие виды самовозгорания существуют? Что выступает источником нагрева в каждом из этих видов?
4. Приведите классификацию химически самовозгорающихся веществ.
5. Какие вещества относятся к легковоспламеняющимся? Приведите примеры таких веществ.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3  
«РАСЧЕТ САМОВОЗГОРАНИЯ ТВЕРДЫХ ГОРЮЧИХ ВЕЩЕСТВ»

При выполнении расчета условий самовозгорания твердых горючих веществ принимаются следующие допущения:

- материал имеет коническую или призматическую форму;
- поверхность горючего материала, которая соприкасается с нижней стенкой емкости, полностью теплоизолирована и не принимает участия в теплообмене;
- боковые стенки горючего вещества окружены воздухом.

Расчет условий самовозгорания производится по эмпирическим формулам с использованием ряда экспериментально определенных констант.

*А) Горение материалов, имеющих коническую форму*

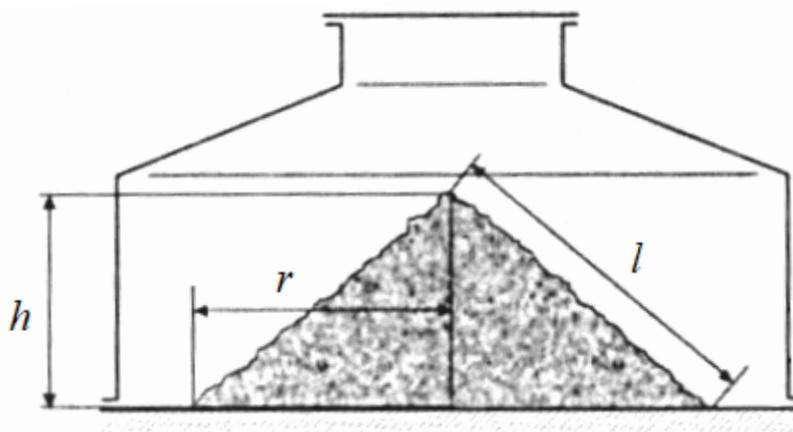


Рисунок 3.1 – Горючий твердый материал конической формы

Порядок выполнения расчета:

1. Определить площадь поверхности конуса по формуле

$$F = \pi \cdot r \cdot l,$$

где образующая конуса

$$l = \sqrt{h^2 + r^2},$$

где  $r$  – радиус основания конуса образца, м;  $h$  – высота конуса, м.

2. Найти объем горючего материала

$$V = \frac{\pi \cdot r^2}{3} \cdot h.$$

3. Определить удельную поверхность горючего материала

$$S = \frac{F}{V}.$$

4. Рассчитать температуру самовозгорания  $t_s$  по формуле

$$\lg t_s = A_p + n_p \cdot \lg S$$

где  $A_p$  и  $n_p$  – экспериментальные константы.

5. Найти индукционный период самовозгорания  $\tau_i$  горючего вещества по формуле

$$\lg \tau_i = \frac{A_b - \lg t_s}{n_b},$$

где  $A_b$  и  $n_b$  – экспериментальные константы.

6. Рассчитать температуру тления  $t_{мл}$  вещества по формуле

$$\lg t_{мл} = A_p + 2,18 \cdot n_p.$$

7. Температуру самонагрева  $t_{сн}$  вещества определить из формулы

$$\lg t_{сн} = A_p.$$

8. Предельная безопасная температура хранения вещества составляет 90% от температуры самонагрева

$$t_{без} = 0,9t_{сн}.$$

Б) Горение материалов, имеющих призматическую форму

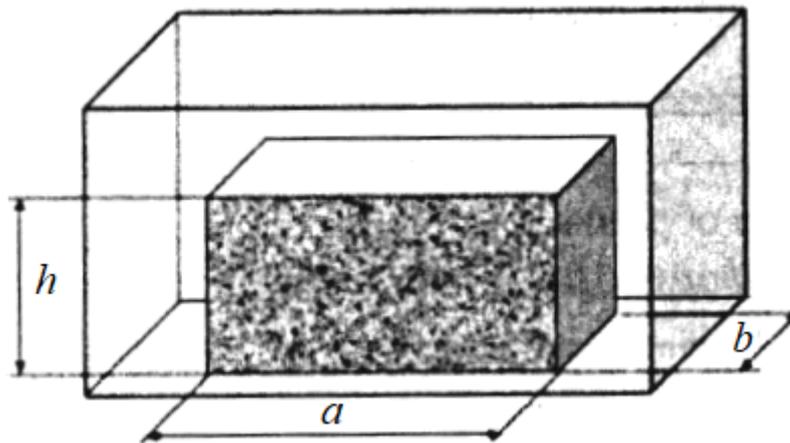


Рисунок 3.2 – Горючий твердый материал призматической формы

Порядок выполнения расчета:

1. Определить площадь поверхности параллелепипеда по формуле

$$F = 2(a \cdot h + b \cdot h + a \cdot b),$$

где  $a$ ,  $b$  и  $h$  – длина, ширина и высота блока материала, м.

2. Найти объем горючего материала

$$V = a \cdot b \cdot h.$$

3. Дальнейшие вычисления производятся в соответствии с пп. 3–8, в примере расчета для образца конической формы.

### Пример 1

Определить температуру и индукционный период самовозгорания, температуру тления и предельную безопасную температуру хранения сосновых опилок. Значения эмпирических констант:  $A_p = 1,855$ ;  $n_p = 0,281$ ;  $A_b = 2,296$ ;  $n_b = 0,196$ . Форма складирования материала – коническая, высота конуса – 3 м, радиус основания – 1 м.

*Решение*

Длина образующей конуса

$$l = \sqrt{h^2 + r^2} = \sqrt{3^2 + 1^2} = \sqrt{10} = 3,16 \text{ м.}$$

Определяем площадь поверхности конуса по формуле

$$F = \pi \cdot r \cdot l = 3,14 \cdot 1 \cdot 3,16 = 9,93 \text{ м}^2.$$

Объем сосновых опилок

$$V = \frac{\pi \cdot r^2}{3} \cdot h = \frac{3,14 \cdot 1^2}{3} \cdot 3 = 3,14 \text{ м}^3.$$

Определяем удельную поверхность горючего материала

$$S = \frac{F}{V} = \frac{9,93}{3,14} = 3,16 \text{ м}^{-1}.$$

Температуру самовозгорания  $t_s$  находим по формуле

$$\lg t_s = A_p + n_p \cdot \lg S = 1,855 + 0,281 \cdot \lg 3,16 = 1,995.$$

$$t_s = 10^{1,995} = 98,8 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Далее определяем индукционный период самовозгорания  $\tau_i$  сосновых опилок

$$\lg \tau_i = \frac{A_b - \lg t_s}{n_b} = \frac{2,296 - 1,995}{0,196} = 1,536.$$

$$\tau_i = 10^{1,536} = 98,8 = 34,3 \text{ ч}.$$

Рассчитываем температуру тления  $t_{мл}$  опилок

$$\lg t_{мл} = A_p + 2,18 \cdot n_p = 1,855 + 2,18 \cdot 0,196 = 2,28.$$

$$t_{мл} = 10^{2,28} = 190,6 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Температура самонагрева  $t_{сн}$  опилок

$$\lg t_{сн} = A_p = 1,855.$$

$$t_{сн} = 10^{1,855} = 71,6 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Предельная безопасная температура хранения вещества составляет 90% от температуры самонагрева

$$t_{без} = 0,9 t_{сн} = 0,9 \cdot 71,6 = 64,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Задача решена.

### Задание к самостоятельной работе № 3

Определить температуру и индукционный период самовозгорания, температуру тления и предельную безопасную температуру хранения горючего материала. Расчетные данные взять из табл. 3.1, а значения эмпирических констант – из *Приложения А*.

*Таблица 3.1 – Исходные данные к самостоятельной работе № 3*

№ вар.	Горючий материал	Размеры, м				Форма материала
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>r</i>	
1	Мука ржаная	-	-	3,5	1,2	Коническая
2	Хлопок	2,0	1,7	2,3	-	Призматическая
3	Торф	-	-	2,4	1,8	Коническая
4	Сено	2,1	1,9	2,3	-	Призматическая
5	Табак	-	-	2,6	1,1	Коническая
6	Солома пшеничная	3,5	2,5	2,4	-	Призматическая
7	Мука шламовая	-	-	2,1	1,7	Коническая
8	Бактериальная масса	3,3	1,8	2,3	-	Призматическая
9	Цианол голубой	-	-	2,1	1,8	Коническая
10	Дрожжи товарные	3,0	1,8	2,2	-	Призматическая
11	Уголь-сырец	-	-	2,0	1,2	Коническая
12	Силос	2,8	1,8	2,3	-	Призматическая
13	Нитрозин	-	-	2,254	0,260	Коническая
14	Строительный войлок	2,7	1,9	2,3	-	Призматическая
15	Уголь бурый	-	-	2,1	1,4	Коническая

## РАЗДЕЛ 4. ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Процесс горения, как было показано выше, зависит не только от свойств горючего и окислителя, но и от внешних условий: температуры, давления, скорости движения воздуха. Поэтому, горение газов, конденсированных веществ и их пылей имеет принципиальные различия.

### 4.1 Горение газов

Практически все горючие газы относятся к классу легковоспламеняющихся, их процесс горения характеризуется областью воспламенения, энергией источника зажигания, температурой горения и скоростью распространения пламени (рис. 4.1). За пределами области воспламенения вещества не могут быть зажжены даже от мощного источника зажигания.

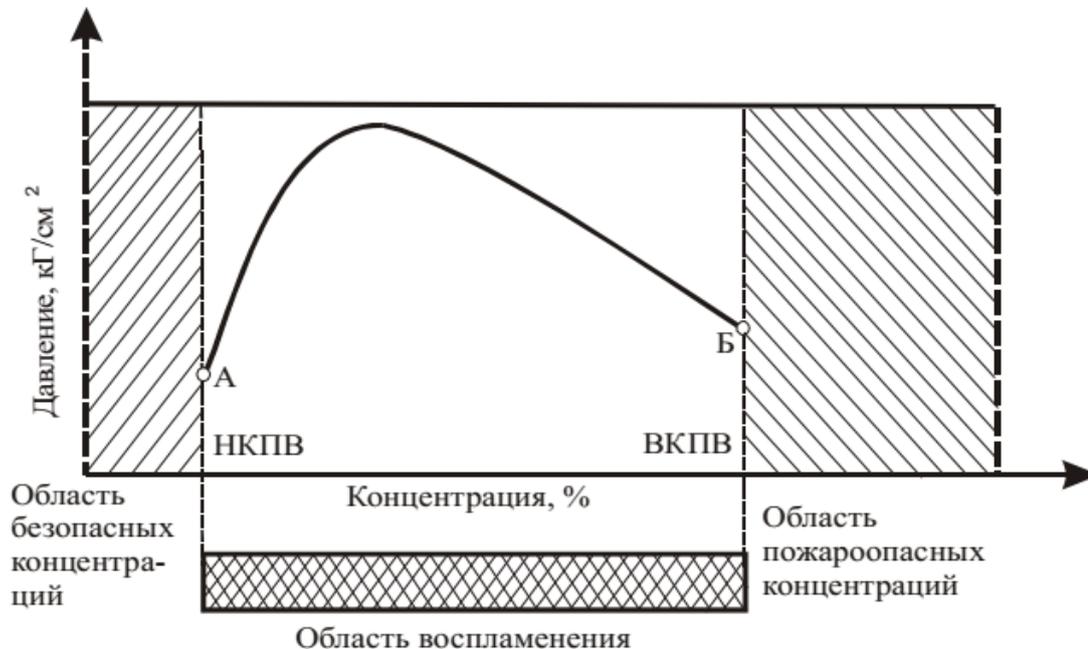


Рисунок 4.1. Зависимость давления при взрыве горючих газопаровоздушных смесей от концентрации горючего в смеси

*Нижний концентрационный предел воспламенения (НКПВ)* – минимальная концентрация газов или паров, при которой смесь воспламеняется от постороннего источника зажигания с последующим распространением по всему объему смеси.

На НКПВ смесь воздуха с горючим содержит избыток воздуха, при концентрации горючего в смеси выше НКПВ скорость горения увеличивается, давление при взрыве повышается до момента достижения стехиометрической концентрации веществ.

*Верхний концентрационный предел воспламенения (ВКПВ)* – наивысшая концентрация горючих газов или паров в смеси, при которой смесь еще воспламеняется от постороннего источника зажигания с распространением горения по всему объему смеси.

Если смесь содержит несколько горючих газов, то верхний и нижний концентрационные пределы воспламенения определяются по формуле

$$\varphi_n = \frac{100}{\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}} \%, \quad (4.1)$$

где  $\varphi_n$  – суммарное содержание горючих газов в смеси с воздухом, соответствующее ВКПВ или НКПВ, %;  $n_i$  – содержание соответствующего компонента газовой смеси, %;  $N_i$  – предел воспламенения (верхний или нижний) данного компонента смеси, %.

*Пожароопасные* – концентрации горючих газов и паров с воздухом выше ВКПВ.

*Область воспламенения* – диапазон концентраций газа или пара в воздухе между верхним и нижним концентрационными пределами воспламенения. Область воспламенения смесей горючих газов зависит от температуры смеси, давления, влажности воздуха, наличия примесей, мощности источника зажигания и т.д.:

- повышение температуры расширяет область воспламенения смесей горючего с воздухом. НКПВ в среднем снижается на 8...10%, а ВКПВ повышается на 12...16%;

- изменение давления вблизи атмосферного практически не влияет на область воспламенения смесей горючего с воздухом;

- влажность воздуха незначительно снижает величину ВКПВ;

- добавление галогеноводородов ( $HF$ ,  $HCl$ ,  $HBr$ ,  $HI$ ) или инертных газов – разбавителей сужает пределы области воспламенения и при определенных соотношениях делает смесь негорючей.

*Минимальная энергия зажигания* – наименьшее значение энергии искры электрического разряда, способной воспламенить наиболее легковоспламеняющуюся смесь данного газа, пара или пыли с воздухом.

*Температура горения* – температура, до которой нагреваются при горении продукты сгорания без учета потерь тепла (теоретическая температура горения) или с учетом потерь тепла (действительная температура горения).

Температуры горения некоторых газов в смесях с воздухом могут достигать 3000°C, что вызывает тепловое самоускорение реакции горения. Максимальная температура горения

$$T_{гор} = \frac{Q - \Delta Q}{\sum C_p}, \quad (4.2)$$

где  $Q$  – теплота, выделившаяся при горении, Дж;  $\Delta Q$  – потери теплоты при горении, Дж;  $\sum C_p$  – сумма теплоемкостей продуктов горения, Дж/К.

*Нормальная скорость горения* – скорость перемещения фронта реакции относительно несгоревшего газа в направлении нормали к поверхности фронта пламени. По мере приближения к пределам ВКПВ и НКПВ нормальная скорость горения падает, повышение температуры слабо

увеличивает скорость горения, инертные примеси ее уменьшают, а активные – увеличивают.

*Массовая скорость горения смеси* – количество вещества, воспламеняющееся на единице поверхности пламени в единицу времени. Единица измерения – г/(см<sup>2</sup>·с).

## 4.2 Горение жидкостей

*Жидкость* – вещество в конденсированном агрегатном состоянии, промежуточном по свойствам между твердым и газообразным. Процесс горения жидкостей определяется областью воспламенения (интервал между НКПВ и ВКПВ), энергией источника зажигания, температурой горения и скоростью распространения пламени (по аналогии с горением газов).

Стадии горения жидкостей:

1. Воспламенение паровоздушной смеси, образовавшейся вследствие испарения вещества с поверхности жидкости.

2. Установление стационарного горения смеси над поверхностью, возможное только при определенной температуре жидкости.

*Зона горения* – тонкий светящийся слой газов, в который с поверхности жидкости поступают горючие пары, а из воздуха – кислород.

*Температура кипения* – важнейшая характеристика жидкости, определяющая процесс горения. Она постоянна у индивидуальных веществ, у веществ сложного состава она изменяется, повышаясь по мере выкипания более легколетучих компонентов.

НКПВ для паров горючих жидкостей ниже, чем для большинства горючих газов, поэтому пары жидкости более пожаро- и взрывоопасны. Область воспламенения горючих жидкостей уже, чем у горючих газов.

*Температура вспышки* – наименьшая температура жидкости, при которой ее пары воспламеняются от источника зажигания без последующего устойчивого горения.

*Температурные пределы воспламенения* – температуры вещества, при которых концентрация его паров в воздухе равны соответственно НКПВ и ВКПВ.

*Сжиженные горючие газы* – вещества в критическом состоянии, при котором исчезает различие между его жидкой и газообразной фазами. Характеристики критического состояния:

- *критическая температура*  $T_{кр}$  – температура, выше которой вещество не может находиться в жидком состоянии;

- *критическое давление*  $P_{кр}$  – давление, при котором еще сохраняется возможность сжижения газообразной фазы;

- *критический объем*  $V_{кр}$  – объем, занимаемый веществом в критическом состоянии.

Критические параметры вещества связаны соотношением

$$\frac{P_{кр} V_{кр}}{RT_{кр}} = z_{кр}, \quad (4.3)$$

где  $R_{кр} = 8,31$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;  $z_{кр}$  – критическая константа, равная 0,375 для газов и 0,27 для углеводородов тяжелее пропана.

Вещества, у которых критическое давление выше атмосферного и температура кипения выше температуры окружающей среды при атмосферном давлении находятся в жидком состоянии. Вещества, у которых критическая температура выше, а температура кипения ниже окружающей среды обладают способностью к мгновенному испарению.

*Криогенные вещества* – вещества, у которых критическая температура ниже температуры окружающей среды.

### 4.3 Горение твердых веществ

Все горючие твердые вещества делятся на:

- *органические* – материалы на основе целлюлозы (древесина, хлопок, х/б ткани, бумага); ископаемые твердые вещества (бурый уголь, каменный уголь, торф); материалы на основе углеводородов и их производных (резина, полимеры, химические волокна и ткани) и продукты питания (зерно, зернопродукты, жиры, сахар);

- *неорганические* – металлы (калий, натрий, магний, алюминий) и неметаллы (сера, фосфор, кремний).

Горение твердых веществ отличается от горения газов наличием стадии разложения и газификации и имеет многостадийный характер. Стадии горения твердых веществ:

- нагрев твердой фазы;
- разложение и выделение газообразных (летучих) продуктов;
- воспламенение и горение газообразных (летучих) продуктов;
- нагрев поверхности твердого вещества, вызывающий поступление в зону горения новых порций горючих газов.

*Целлюлозные материалы* содержат в своем составе углерод С, водород  $H_2$  и, чаще всего, кислород  $O_2$ , принимающий участие в горении. Наиболее распространенный горючий материал – древесина. Особенности горения древесины: низкая теплопроводность, быстрая воспламеняемость и медленный прогрев внутренних слоев.

Стадии горения древесины:

- при контакте с пламенем нагревается тонкий поверхностный слой;
- из древесины испаряется влага и начинается ее разложение, а в продуктах разложения содержится водяной пар и углекислый газ;
- повышение температуры до 250...600°С приводит к выделению горючих газов  $CO$  и  $CH_4$ , которые воспламеняются от источника зажигания;
- начинается самостоятельное горение древесины, ее верхний слой превращается в уголь;
- по мере сгорания верхнего слоя начинают разлагаться примыкающие к нему внутренние слои;
- по мере выгорания древесины прекращается горение горючих газов и имеет место только горение угля.

*Полимерные материалы* содержат в большом количестве углерод  $C$  и большинство из них не содержит кислорода. Их горение происходит с выделением большого количества сажи – продуктов неполного сгорания. Большинство полимеров плавится при нагревании.

*Металлические материалы* при контакте с пламенем покрываются оксидной пленкой, которая препятствует доступу кислорода. Дальнейший нагрев металла приводит к его испарению и нагреву до температуры кипения. Признаком горения металлов является наличие белого плотного дыма.

**Горючая пыль** – это дисперсная система, состоящая из твердых частиц размером  $\leq 850$  мкм, находящихся во взвешенном или осевшем состоянии в газовой среде, способная к самостоятельному горению в воздухе.

*Взрывоопасные* – пыли с нижним концентрационным пределом воспламенения НКПВ  $\leq 65$  г/м<sup>3</sup>. В свою очередь делятся на наиболее взрывоопасные с НКПВ  $< 15$  г/м<sup>3</sup> (сера, древесная мука) и взрывоопасные НКПВ = 15...65 г/м<sup>3</sup> (магний, полистирол, пыль мучная и т.д.).

*Пожароопасные* – пыли с нижним концентрационным пределом воспламенения НКПВ  $> 65$  г/м<sup>3</sup>. Делятся на наиболее пожароопасные с НКПВ  $\leq 250$  г/м<sup>3</sup> (табачная и элеваторная пыль) и пожароопасные НКПВ  $> 250$  г/м<sup>3</sup> (древесные опилки, цинковая пыль и т.д.).

Характеристики пожароопасности пылей:

- *дисперсность* – степень измельченности частиц. С уменьшением среднего размера частиц пылей повышается их химическая активность, а значит – пожаро- и взрывоопасность;

- *химическая активность* – способность пылей вступать в химические реакции. Мелкодисперсные пыли негорючих металлов (железа, алюминия, цинка) воспламеняются при контакте с воздухом;

- *адсорбционная способность* – способность частиц пыли поглощать газы из окружающей среды. Поглощение горючих газов повышает пожароопасность пылей, а негорючих – понижает.

#### 4.4 Тепловые эффекты реакций горения

Тепловой эффект реакции горения определяется исключительно начальным и конечным состояниями реагирующих веществ и не зависит от числа ее промежуточных стадий. Поэтому для его определения достаточно брутто-уравнения реакции горения данного вещества.

*Теплота сгорания* – количество теплоты, выделившейся при полном сгорании единицы массы (для веществ в конденсированном состоянии) или объема (для газов) вещества. В общем случае теплота сгорания равна изменению энтальпии  $H$  химической реакции, взятому с противоположным знаком

$$Q_g = -\Delta H. \quad (4.4)$$

*Удельная теплота сгорания* – теплота сгорания, отнесенная к единице массы или объема горючего вещества (Дж/кг, Дж/моль, Дж/м<sup>3</sup>).

*Высшая теплота сгорания* – количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании вещества, включая теплоту конденсации водяных паров при охлаждении продуктов сгорания.

*Низшая теплота сгорания* – количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании, без учета теплоты конденсации водяного пара.

Низшая и высшая теплота сгорания связаны соотношением

$$Q_B = Q_H + (\omega_W + 9 \cdot \omega_H), \quad (4.5)$$

где  $k = 25$  кДж/кг – коэффициент пропорциональности;  $\omega_W$  – содержание воды в горючем веществе, % массы;  $\omega_H$  – содержание водорода в горючем веществе, % массы.

*Скрытая теплота сгорания* – теплота конденсации водяных паров.

*Предельная теплота горения* – количество теплоты, выделяемое при горении  $1 \text{ м}^3$  газозадушной смеси на нижнем концентрационном пределе воспламенения. Данная величина постоянна для различных смесей и составляет  $Q_{np} = 1830$  Дж.

Нижний концентрационный предел воспламенения может быть выражен через предельную теплоту горения по формуле

$$\varphi_H = \frac{Q_{np} \cdot 100}{Q_H} = \frac{1830 \cdot 100}{Q_H} = \frac{1,83 \cdot 10^5}{Q_H}, \quad (4.6)$$

где  $Q_H$  – низшая теплота сгорания горючего вещества, кДж/м<sup>3</sup>.

Также нижний и верхний концентрационные пределы воспламенения могут быть приблизительно определены по аппроксимационной формуле

$$\varphi_{H,B} = \frac{100}{an + b}, \quad (4.7)$$

где  $n$  – стехиометрический коэффициент при кислороде в уравнении химической реакции;  $a$  и  $b$  – эмпирические константы.

Значения эмпирических констант:

- для нижнего концентрационного предела воспламенения (НКПВ)

$$a = 8,684; b = 4,679;$$

- для верхнего концентрационного предела воспламенения при стехиометрическом коэффициенте при кислороде в уравнении химической реакции  $n \leq 7,5$

$$a = 1,55; b = 0,56;$$

- для ВКПВ при стехиометрическом коэффициенте при кислороде в уравнении химической реакции  $n > 7,5$

$$a = 0,768; b = 6,554.$$

Концентрационные пределы воспламенения паров жидких и твердых веществ могут быть рассчитаны, если известны температурные пределы

$$\varphi_{H,B} = \frac{p_{n,v} \cdot 100}{p_0} = \frac{1830 \cdot 100}{Q_H} = \frac{1,83 \cdot 10^5}{Q_H}, \quad (4.8)$$

где  $p_{n,v}$  – давление насыщенного пара вещества при температуре, соответствующей нижнему (верхнему) пределу воспламенения, Па;  $p_0$  – давление окружающей среды, Па.

Если известны концентрационные пределы воспламенения при температуре  $T_1$ , то при температуре  $T_2$  они вычисляются по формулам

$$\varphi_{H2} = \varphi_{H1} \cdot \left(1 - \frac{T_2 - T_1}{T_G - T_1}\right), \quad \varphi_{B2} = \varphi_{B1} \cdot \left(1 + \frac{T_2 - T_1}{T_G - T_1}\right), \quad (4.9)$$

где  $T_G$  – температура горения смеси, равная 1 550 К для НКПВ и 1 100 К – для НКПВ.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПРЕДЕЛОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ»

*А) Определение концентрационных пределов воспламенения по теплоте сгорания*

Порядок решения задачи:

1. Рассчитать массовую долю каждого химического элемента, входящего в состав данного вещества, по формуле

$$\omega_i = \frac{n_i \cdot \mu_i}{\mu_{\text{в}}},$$

где  $n_i$  – число атомов данного элемента в молекуле;  $\mu_i$  – молярная масса данного элемента, кг/моль;  $\mu_{\text{в}}$  – молярная масса химического соединения, кг/моль;

2. Определить низшую теплоту сгорания вещества  $Q_H$  по формуле Менделеева

$$Q_H = 339,4 \cdot \omega_C + 1257 \cdot \omega_H - 108,9 \cdot (\omega_O + \omega_N - \omega_S) - 25,1 \cdot (9 \cdot \omega_H + \omega_W).$$

Данная формула применима как для индивидуальных веществ, так и для веществ сложного состава, содержащих влагу  $W$ .

3. Нижний концентрационный предел воспламенения вещества определить по формуле (4.6)

$$\varphi_H = \frac{1,83 \cdot 10^5}{Q_H}.$$

4. Высшая теплота сгорания вещества определяется по формуле (4.5)

$$Q_B = Q_H + (\omega_W + 9 \cdot \omega_H).$$

### Пример 1

По предельной теплоте сгорания определить нижний концентрационный предел воспламенения нитробензола  $C_6H_5NO_2$  в воздухе.

*Решение*

Определяем молярную массу нитробензола

$$\mu_{\text{в}} = 6 \cdot 12 + 5 \cdot 1 + 1 \cdot 14 + 2 \cdot 16 = 123 \text{ кг/кмоль}.$$

Далее производим расчет процентного состава каждого химического элемента в нитробензоле

$$\omega_C = \frac{6 \cdot 12}{123} \cdot 100\% = 58,5\%; \quad \omega_H = \frac{5 \cdot 1}{123} \cdot 100\% = 4,1\%;$$

$$\omega_N = \frac{1 \cdot 14}{123} \cdot 100\% = 11,4\%; \quad \omega_O = \frac{2 \cdot 16}{123} \cdot 100\% = 26,0\%.$$

Находим низшую теплоту сгорания нитробензола по формуле Менделеева

$$Q_H = 339,4 \cdot \omega_C + 1257 \cdot \omega_H - 108,9 \cdot (\omega_O + \omega_N) - 25,1 \cdot 9 \cdot \omega_H = .$$

$$= 339,4 \cdot 58,5 + (1257 - 25,1 \cdot 9) \cdot 4,1 - 108,9 \cdot (26,0 + 11,4) = 16813 \text{ кДж/кг.}$$

Тогда нижний концентрационный предел воспламенения нитробензола

$$\varphi_H = \frac{1,83 \cdot 10^5}{Q_H} = \frac{1,83 \cdot 10^5}{16813} = 10,9\% .$$

Задача решена.

*Б) Определение концентрационных пределов воспламенения по аппроксимационной формуле*

Порядок решения задачи:

1. Составить реакцию горения данного вещества.
2. Определить из реакции горения стехиометрический коэффициент при кислороде.
3. Вычислить верхний и нижний концентрационные пределы воспламенения по формуле (4.7)

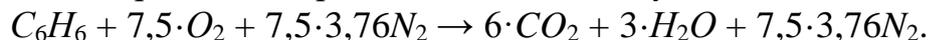
$$\varphi_{H,B} = \frac{100}{an + b} .$$

### Пример 2

По аппроксимационной формуле определить верхний и нижний концентрационные пределы воспламенения бензола  $C_6H_6$  в воздухе.

*Решение*

Составляем реакцию горения бензола в воздухе



Из уравнения реакции определяем стехиометрический коэффициент при кислороде

$$n = 7,5.$$

При стехиометрическом коэффициенте  $n \leq 7,5$  используются следующие значения параметров:

- для нижнего концентрационного предела воспламенения  
 $a = 8,684$  и  $b = 4,679$ ;
- для верхнего концентрационного предела воспламенения  
 $a = 1,55$  и  $b = 0,56$ .

Определяем концентрационные пределы воспламенения

$$\varphi_H = \frac{100}{an + b} = \frac{100}{8,684 \cdot 7,5 + 4,679} = 1,43\%;$$

$$\varphi_B = \frac{100}{an + b} = \frac{100}{1,55 \cdot 7,5 + 0,56} = 8,21\%.$$

Задача решена.

*В) Определение концентрационных пределов воспламенения смесей по температурным пределам воспламенения*

Порядок решения задачи:

1. По формуле Антуана давление насыщенных паров, соответствующее нижнему и верхнему концентрационным пределам воспламенения

$$\lg P_{H(B)} = A - \frac{B}{C + t_{H(в)}}$$

где  $A$ ,  $B$  и  $C$  – константы Антуана;  $t_{H(в)}$  – нижний (верхний) температурный предел воспламенения, °С.

2. Выразить из предыдущей формулы  $P_{H(B)}$  и перевести полученный результат в Паскали.

3. Нижний и верхний концентрационный пределы воспламенения вещества вычислить по формуле

$$\varphi_{H(B)} = \frac{P_{H(B)}}{P_0} \cdot 100\%.$$

### Пример 3

Определить концентрационные пределы воспламенения насыщенных паров бензола в воздухе, если известно, что его температурные пределы составляют 259–283 К. Горение происходит при нормальном атмосферном давлении.

*Решение*

Определяем по *Приложению Б* значения констант:  $A = 6,489$ ;  $B = 902,275$  и  $C = 178,099$  для бензола.

Подставляя значения, получаем

$$\lg P_H = A - \frac{B}{C + t_H} = 6,489 - \frac{902,275}{178,099 + (259 - 273)} = 0,989.$$

Значение давления насыщенных паров, соответствующее нижнему концентрационному пределу воспламенения, находим по формуле

$$P_H = 10^{0,989} = 9,75 \text{ мм рт. ст.}$$

Переводим полученное значение в систему СИ

$$P_H = 9,75 \cdot 133,2 = 1298,7 \text{ Па.}$$

Аналогично находим давление насыщенных паров бензола, соответствующее верхнему концентрационному пределу воспламенения

$$\lg P_B = A - \frac{B}{C + t_B} = 6,489 - \frac{902,275}{178,099 + (283 - 273)} = 1,692.$$

$$P_B = 10^{1,692} = 49,20 \text{ мм рт. ст.}$$

Переводим полученное значение в систему СИ

$$P_H = 49,20 \cdot 133,2 = 6553,4 \text{ Па.}$$

Определяем нижний концентрационный предел воспламенения

$$\varphi_H = \frac{P_H}{P_0} \cdot 100\% = \frac{1298,7}{101325} \cdot 100\% = 1,28\%$$

и верхний концентрационный предел воспламенения

$$\varphi_B = \frac{P_B}{P_0} \cdot 100\% = \frac{6553,4}{101325} \cdot 100\% = 6,47\% .$$

Задача решена.

Г) *Определение концентрационных пределов воспламенения смесей по принципу Ле-Шателье*

Порядок решения задачи:

1. Определить нижний и верхний концентрационные пределы воспламенения смеси по теплоте сгорания, аппроксимационной формуле или по температурным пределам воспламенения.
2. Нижний концентрационный предел воспламенения смеси (в % объема) определить по формуле

$$\varphi_H^{см} = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{\mu_i}{\varphi_{Hi}}},$$

где  $\mu_i$  – доля  $i$ -го горючего компонента в смеси, кг/кмоль;  $\varphi_{Hi}$  – НКПВ  $i$ -го горючего компонента смеси, % объема;  $k$  – количество компонент смеси.

3. Верхний концентрационный предел воспламенения смеси (в % объема) определить по формуле

$$\varphi_B^{см} = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{\mu_i}{\varphi_{Bi}}},$$

где  $\varphi_{Bi}$  – ВКПВ  $i$ -го горючего компонента смеси, %.

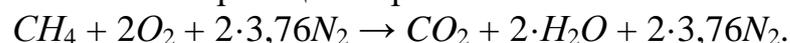
4. Если в состав смеси также входят негорючие компоненты, то при определении доли  $i$ -го горючего компонента смеси эти компоненты не учитываются.

#### Пример 4

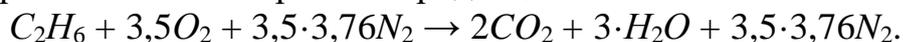
Определить верхний и нижний концентрационные пределы воспламенения газовой смеси, состоящей из 60% метана  $CH_4$ , 30% угарного газа  $CO$  и 10% этана  $C_2H_6$ .

*Решение*

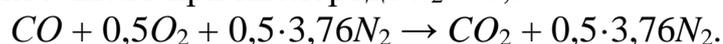
Все три компонента смеси являются горючими газами, поэтому для каждого из них составляем реакции горения



Стехиометрическое число при кислороде  $n_1 = 2$ .



Стехиометрическое число при кислороде  $n_2 = 3,5$ .



Стехиометрическое число при кислороде  $n_3 = 0,5$ .

По аппроксимационной формуле определяем верхний и нижний концентрационные пределы воспламенения:

- для метана  $CH_4$

$$\varphi_H = \frac{100}{an_1 + b} = \frac{100}{8,684 \cdot 2 + 4,679} = 4,54\%; \quad \varphi_B = \frac{100}{an_1 + b} = \frac{100}{1,55 \cdot 2 + 0,56} = 27,32\%;$$

- для этана  $C_2H_6$

$$\varphi_H = \frac{100}{an_2 + b} = \frac{100}{8,684 \cdot 3,5 + 4,679} = 2,85\%; \quad \varphi_B = \frac{100}{an_2 + b} = \frac{100}{1,55 \cdot 3,5 + 0,56} = 16,71\%;$$

- для угарного газа  $CO$

$$\varphi_H = \frac{100}{an_3 + b} = \frac{100}{8,684 \cdot 0,5 + 4,679} = 11,09\%; \quad \varphi_B = \frac{100}{an_3 + b} = \frac{100}{1,55 \cdot 0,5 + 0,56} = 70,80\%.$$

Определяем нижний концентрационный предел смеси

$$\varphi_H^{см} = \frac{100}{\frac{\mu_{CH_4}}{\varphi_H} + \frac{\mu_{C_2H_6}}{\varphi_H} + \frac{\mu_{CO}}{\varphi_H}} = \frac{100}{\frac{60}{4,54} + \frac{10}{2,85} + \frac{30}{11,09}} = \frac{100}{13,22 + 3,51 + 2,71} = 5,15\%.$$

Определяем верхний концентрационный предел смеси

$$\varphi_B^{см} = \frac{100}{\frac{\mu_{CH_4}}{\varphi_B} + \frac{\mu_{C_2H_6}}{\varphi_B} + \frac{\mu_{CO}}{\varphi_B}} = \frac{100}{\frac{60}{27,32} + \frac{10}{16,71} + \frac{30}{70,80}} = \frac{100}{2,20 + 0,60 + 0,42} = 31,06\%.$$

Задача решена.

#### Задание к самостоятельной работе № 4

Рассчитать концентрационные пределы воспламенения паров (НКПВ и ВКПВ) заданного вещества в воздухе. Данные для расчета взять из табл. 4.1

Таблица 4.1 – Исходные данные к самостоятельной работе № 4

Вариант	Горючее вещество	Условие задачи
1	Фенол $C_6H_6O$	По теплоте сгорания
	Смесь газов: $CO$ – 15%, $CH_4$ – 35%, $C_2H_6$ – 50%	По формуле Ле-Шателье
2	Стирол $C_8H_8$	По аппроксимационной формуле
	Смесь газов: $CO$ – 20%, $CH_4$ – 25%, $C_2H_2$ – 55%	По формуле Ле-Шателье
3	Гексиловый спирт $C_6H_{14}O$	По температурным пределам воспламенения
	Смесь газов: $CO$ – 50%, $C_2H_6$ – 20%, $C_3H_8$ – 30%	По формуле Ле-Шателье
4	Фталевый ангидрид $C_8H_4O_3$	По температурным пределам воспламенения
	Смесь газов: $CH_4$ – 40%, $C_2H_6$ – 25%, $C_3H_8$ – 35%	По формуле Ле-Шателье

Вариант	Горючее вещество	Условие задачи
5	Ацетон $C_3H_6O$	По теплоте сгорания
	Смесь газов: $C_2H_6$ – 65%, $C_3H_8$ – 35%	По формуле Ле-Шателье
6	Амиловый спирт $C_5H_{12}O$	По аппроксимационной формуле
	Смесь газов: $C_5H_{12}$ – 60%, $C_6H_{14}$ – 40%	По формуле Ле-Шателье
7	Уксусная кислота $C_2H_4O_2$	По температурным пределам воспламенения
	Смесь газов: $C_3H_8$ – 45%, $C_6H_{14}$ – 40%, $C_7H_{16}$ – 15%	По формуле Ле-Шателье
8	Глицерин $C_3H_8O_3$	По теплоте сгорания
	Смесь газов: $CO$ – 25%, $CH_4$ – 35%, $C_3H_8$ – 40%	По формуле Ле-Шателье
9	Метиловый спирт $CH_3OH$	По аппроксимационной формуле
	Смесь газов: $CO$ – 45%, $CH_4$ – 30%, $C_2H_6$ – 25%	По формуле Ле-Шателье
10	Этиловый спирт $C_2H_5OH$	По температурным пределам воспламенения
	Смесь газов: $CO$ – 55%, $C_2H_6$ – 25%, $C_5H_{12}$ – 20%	По формуле Ле-Шателье
11	Бутиловый спирт $CH_9OH$	По аппроксимационной формуле
	Смесь газов: $CO$ – 40%, $CH_4$ – 35%, $C_2H_6$ – 25%	По формуле Ле-Шателье
12	Муравьиная кислота $CH_2O_2$	По теплоте сгорания
	Смесь газов: $CH_4$ – 35%, $C_2H_6$ – 25%, $C_3H_8$ – 25%	По формуле Ле-Шателье
13	Метилэтилкетон $C_4H_8O$	По температурным пределам воспламенения
	Смесь газов: $CH_3$ – 35%, $C_2H_5$ – 25%, $CO_2$ – 25%	По формуле Ле-Шателье
14	Глюкоза $C_6H_{12}O_6$	По теплоте сгорания
	Смесь газов: $CO$ – 25%, $CO_2$ – 35%, $C_2H_6$ – 40%	По формуле Ле-Шателье
15	Анилин $C_6H_5NH_2$	По аппроксимационной формуле
	Смесь газов: $CO$ – 25%, $CH_4$ – 35%, $C_2H_6$ – 40%	По формуле Ле-Шателье

## ГЛАВА II ТЕОРИЯ ВЗРЫВА

### РАЗДЕЛ 5. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВЗРЫВЕ И ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВАХ

#### 5.1 Общие сведения о взрывных процессах

**Взрыв** – процесс практически мгновенного физико-химического превращения вещества, сопровождающийся выделением значительного количества энергии и возникновением интенсивного скачка давления.

Принципиальное различие между реакциями горения и взрыва состоит в скорости их протекания. При взрыве превращение энергии происходит настолько быстро, что все выделившееся тепло остается в системе, а образовавшиеся продукты не успевают расшириться. Таким образом, процесс взрыва можно считать одновременно адиабатическим ( $\delta Q = 0$ ) и изохорным ( $V = \text{const}$ ).

Количество теплоты, выделяющееся при взрыве, примерно равно низшей теплоте сгорания вещества

$$Q_{\text{взр}} \approx Q_n, \quad (5.1)$$

но температура взрыва значительно выше температуры горения вещества. Причина в том, что при горении часть выделившегося тепла затрачивается на расширение газа, а при взрыве все выделившееся тепло расходуется только на увеличение внутренней энергии системы.

Классификация взрывных явлений может быть произведена по ряду признаков. По **виду источника энергии** взрывы бывают:

- *химический* – источником энергии является быстропротекающая химическая реакция. К взрыву приводит выделение в малом объеме значительного количества энергии за крайне малый промежуток времени;

- *ядерный* – энергия выделяется в результате радиоактивного распада тяжелых ядер или синтеза легких. По энерговыделению ядерный взрыв превосходит химический десятки-сотни миллионов раз;

- *механический* – имеет место при переходе в тепловую энергию кинетической энергии тел, движущихся с большими скоростями. Часть вещества тела из-за разогрева поверхности переходит в сильно нагретый газ, способный к взрывному расширению. Падение метеорита является примером механического взрыва;

- *электрический* – возникает при искровом разряде или прохождении через проводник тока большой силы за короткий промежуток времени;

- *лазерный* – концентрация большого количества энергии лазерного излучения в микрообъеме вещества приводит к его мгновенному разогреву и взрывному расширению;

- *физический* – вызван внезапным переходом потенциальной энергии сжатых веществ в кинетическую энергию их движения. Характерен для взрывов баллонов со сжатыми газами.

В зависимости от **скорости протекания взрывной реакции** различают:

- *детонационный взрыв* – воспламенение соседних слоев взрывчатого вещества происходит в результате сжатия и нагрева ударной волной. Ударная волна и зона химической реакции неразрывно движутся друг за другом с постоянной сверхзвуковой скоростью ( $v_{вз} > 340$  м/с);

- *дефлаграционный взрыв* – нагрев и воспламенение последующих слоев взрывчатого вещества происходят в результате диффузии и теплопередачи, а фронт ударной волны и фронт пламени движутся с дозвуковой скоростью ( $v_{вз} < 340$  м/с).

Механизмы возникновения взрыва также принципиально различны. При *тепловом взрыве* в веществе нарушается тепловое равновесие – образование тепла существенно превосходит теплоотдачу. Это приводит к лавинообразному нарастанию скорости реакции и росту температуры до самого момента взрыва.

Взрыв *при ударе* вызывается появлением местных микроскопических разогревов, приводящих к развитию микроочагов горения, из которых процесс горения распространяется на всю систему. И если на открытом воздухе чаще всего имеет место медленное горение, то в условиях замкнутого объема возникает повышение давления, являющееся основным фактором перехода горения во взрыв.

Для того чтобы протекать в форме взрыва, химическая реакция должна удовлетворять следующим четырем взаимосвязанным требованиям:

1. *Экзотермичность* превращения взрывчатого вещества в продукты взрыва – характерна для веществ, у которых прочность связей между атомами у конечных продуктов выше, чем у исходного вещества. Наиболее распространены взрывчатые вещества, содержащие группу  $NO_2$ , основное тепловыделение обусловлено окислением  $C$  и  $H$  кислородом, содержащимся в данной нитрогруппе;

2. *Образование газообразных продуктов взрыва* – взрывчатое вещество из конденсированного или газообразного состояния переходит обязательно в газообразное состояние. Газообразные продукты выступают в роли энергоносителей, передающих потенциальную энергию взрыва окружающей среде при собственном расширении. Скорость передачи энергии химической реакции за счет теплопроводности существенно ниже и потому не способна обеспечить развитие взрыва.

3. *Способность к самораспространению* определяется скоростью реакции взрыва. Интенсивное тепловыделение приводит к образованию резкого скачка давления, в результате чего формируется фронт ударной волны.

4. *Большая скорость* распространения реакции, приводящая к существенной роли волновых эффектов в процессе превращения вещества.

**По природе происхождения** все взрывы можно разделить на:

- *природные* – являющиеся следствием явлений в природе, таких как падения метеоритов, извержения вулканов или разряды молний;

- *преднамеренные* – реализуемые человеком в определенных целях. К ним относятся взрывы взрывчатых веществ, исследовательские и промышленные взрывы, процессы в цилиндрах ДВС;

- *случайные* – аварийные взрывы, физические взрывы, детонация взрывчатых веществ в конденсированном состоянии, взрывы пылевзвесей.

Наиболее распространенными и изученными являются физические взрывы, как реализуемые целенаправленно, так и случайные.

## 5.2 Взрывчатые вещества, их классификация

*Взрывчатые вещества (ВВ)* – химические соединения или смеси веществ, способные к быстрому превращению, которое сопровождается выделением значительной удельной энергии, образованием газообразных продуктов и самораспространением в форме ударной волны.

Превращение взрывчатых веществ в газообразные продукты происходит без участия кислорода, поэтому объемная концентрация энергии во взрывчатом веществе очень велика. В сочетании с очень большой скоростью химического превращения это делает взрывчатое вещество высококонцентрированным источником энергии.

Классификация взрывчатых веществ производится по их агрегатному состоянию, химическому составу и виду взрывчатого превращения. По составу взрывчатые вещества делятся на две группы:

1. *Индивидуальные соединения* – органические соединения, содержащие одну или более групп  $NO_2$ . Под внешним воздействием у них происходит разрыв химических связей, в результате чего горючие элементы соединяются с окислительными.

К индивидуальным ВВ относятся нитросоединения (тринитротолуол, тринитрофенол, тринитробензол и др.), нитроамины (гексоген, октоген и др.), эфиры азотной кислоты многоатомных спиртов и углеводов (нитроглицерин, диэтиленгликольдинитрат, нитроцеллюлоза и др.), соли азотной, гремучей и азотистоводородной кислот.

2. *Смеси* – композиции из двух и более химически не связанных между собой веществ. Обычно одни компоненты богаты кислородом, а в других его недостаточно, либо нет вообще (углеводы, металлы). При взрывчатом превращении элементы горючего окисляются за счет кислорода, содержащегося в окислителе.

К взрывчатым смесям относятся порох, смеси и сплавы нитросоединений, аммиачно-селитренные и смеси, твердые пористые горючие вещества, пропитанные жидким кислородом и др.

По *агрегатному состоянию* взрывчатые вещества делятся на:

- *газообразные взрывчатые смеси* – горючие газы, жидкости в виде аэрозолей и твердые вещества в виде пыли, содержащиеся в атмосферном воздухе. В таких ВВ чаще всего имеет место каскадная инициация взрыва: на первом этапе распыляется топливо, на которое затем производится иницирующее воздействие, непосредственно вызывающее взрыв.

- *жидкие ВВ* – вещества, находящиеся при нормальных условиях в жидком состоянии. Протекание реакции превращения происходит в виде процесса локальных микровзрывов, инициируемых кавитационными явлениями;

- *твердые* – в результате инициирующего воздействия от детонатора первоначально в малом объеме вещества образуется локальная зона с высокими значениями температуры и давления, в которой подведенной происходит разрушение вещества на отдельные молекулы и атомы в виде плазмы.

Склонность веществ к переходу от горения к детонации положена в основу их классификации по виду взрывчатого превращения:

1. *Иницирующие ВВ* – обладают высокой чувствительностью к внешним воздействиям (удару, нагреву), горение переходит в детонацию практически мгновенно ( $\sim 10^{-6}$  с). Их используют в качестве средств детонирования, вследствие чего также называют первичными взрывчатыми веществами. Типичными представителями являются гремучая ртуть, азид свинца, тетразен и другие.

2. *Бризантные ВВ* – малочувствительны к слабым внешним воздействиям, их детонация возбуждается ударными волнами от инициирующего ВВ. Из-за выраженного дробящего эффекта являются основными веществами, применяемыми при производстве боеприпасов и проведении взрывных работ.

Сами же бризантные ВВ подразделяются на вещества повышенной (гексоген, тетрил и др.), нормальной (тол, тринитротолуол и др.) и пониженной (нитроглицерин, аммиачная селитра) мощности.

3. *Метательные ВВ* – нечувствительны к внешним воздействиям (за исключением теплового), и имеют устойчивое послойное горение без перехода во взрыв вплоть до давлений  $\sim 10^9$  Па. Их действие состоит в отбрасывании и разбрасывании вещества при отсутствии дробящего эффекта, поэтому они используются для метания тел в ствольных системах или создания реактивной тяги в ракетных двигателях.

К метательным ВВ относятся все виды порохов и смесевые твердые топлива.

4. *Пиротехнические составы* – при горении дают световые, тепловые, дымовые, реактивные и звуковые эффекты. По виду достигаемого эффекта делятся на осветительные составы, фотосмеси, трассирующие и сигнальные составы, составы инфракрасного излучения, маскирующие дымообразующие и зажигательные составы. Не являются взрывчатыми веществами, но относятся к ним вследствие способности испытывать взрывные превращения.

Такие составы состоят из горючего (металлы *Al, Mg, Zr, Ti*, их сплавы, углеводородные смеси и углеводы), окислителя (оксиды металлов или или кислородсодержащие соли) и специальных компонентов.

### 5.3 Характеристики взрывчатых веществ

Для количественного и качественного описания процессов превращения взрывчатых веществ в продукты взрыва введен целый ряд характеристик.

*Чувствительность ВВ* – минимальная величина начального импульса, достаточная для возникновения взрыва. В качестве импульса может

выступать нагревание, удар, трение, действие взрыва другого взрывчатого вещества.

Наиболее распространенными являются исследования от ударных и тепловых инициирующих импульсов. В первом случае определяется процент взрывов при падении ВВ массой 10 кг с высоты 0,25 м, во втором – температура вспышки данного вещества.

*Стойкость ВВ* – способность сохранять физические и химические свойства при длительном хранении. Разложение нестойкого ВВ при определенных условиях может привести к самовоспламенению и взрыву.

Химическую стойкость оценивают по времени достижения определенной степени разложения при нагревании навески данного вещества в стандартных условиях.

*Энергия взрывчатого превращения* – максимальная работа, которая может быть произведена взрывом. Она зависит от теплоты взрывчатого превращения, объема и состава газообразных продуктов реакции, определяется расчетным или экспериментальным путем.

*Действие взрыва* – используется при оценке механического эффекта взрыва. Различают дробящее и фугасное действие, первое из них проявляется в непосредственной близости к очагу взрыва, второе – на некотором расстоянии от него. Дробящее действие оценивается максимальным давлением во фронте детонации, а фугасное – по увеличению канала свинцовой бомбы стандартных размеров после взрыва в нем 10 г взрывчатого вещества.

*Максимальное давление взрыва  $P_{max}$*  – давление среды, возникающее в условиях реализации изобаро-изохорного процесса превращения взрывчатого вещества в продукты взрыва. Определяется максимальное давление по формуле

$$P_{max} = \frac{P_0 \cdot T_{вз} \cdot n_{нв}}{T_0 \cdot n_{см}}, \quad (5.1)$$

где  $P_0$  – давление вещества (смеси) до взрыва, Па;  $T_0$  – температура вещества (смеси) до взрыва, К;  $n_{см}$  – количество вещества (смеси) до взрыва, кмоль;  $T_{вз}$  – температура взрыва, К;  $n_{нв}$  – количество продуктов взрыва, кмоль.

*Избыточное давление взрыва  $\Delta P$* , Па – разность между максимальным давлением и давлением смеси до взрыва

$$\Delta P = P_{max} - P_0. \quad (5.2)$$

Максимальное давление при взрыве достигается только в том случае, если в герметичном объеме полностью вступит в реакцию все взрывчатое вещество, в котором горючее и окислитель находятся в стехиометрическом соотношении, а сам процесс взрыва будет протекать адиабатически. В реальных условиях взрыва максимальное давление не достигается.

*Удельная энергия взрыва  $q$* , кДж/кг – количество энергии, выделившейся при взрыве единицы массы данного взрывчатого вещества. Для ее описания используется понятие тротилового эквивалента, поскольку

известно, что при взрыве 1 кг тротила (ТНТ) выделяется удельная энергия  $q_{\text{ТНТ}} = 4,24 \cdot 10^3$  кДж.

Тротиловый эквивалент взрыва, в общем случае, будет равен

$$M_{\text{ТНТ}} = \frac{0,4}{0,9} \cdot \frac{q_{\text{вв}} m \gamma}{q_{\text{ТНТ}}}, \quad (5.3)$$

где  $q_{\text{вв}}$  – мощность взрыва данного вещества, кДж/кг;  $m$  – масса горючего вещества, участвующего во взрыве, кг;  $\gamma$  – доля потенциальной энергии, перешедшей в кинетическую энергию взрыва; 0,4 – доля энергии парогазовой смеси, затрачиваемая на образование ударной волны; 0,9 – доля энергии ТНТ, затрачиваемая на образование ударной волны;

Коэффициент  $\gamma$  принимает следующие значения:

- $\gamma = 1$  – при взрыве парогазовых смесей в замкнутом объеме (оборудование, помещение), водород;
- $\gamma = 0,5$  – горючие газы (кроме водорода) и пыли;
- $\gamma = 0,4$  – при взрыве в неограниченном объеме (взрыв облака парогазовой смеси);
- $\gamma = 0,3$  – легковоспламеняющиеся и горючие жидкости, нагретые до температуры вспышки и выше.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВА ВЕЩЕСТВ И СМЕСЕЙ

### *А) Давление взрыва парогазовых смесей*

Порядок решения задачи:

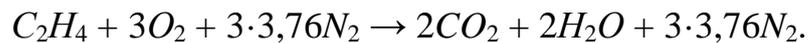
1. Составить реакцию горения данного вещества в воздухе.
2. Из левой части уравнения определить количество исходной смеси стехиометрического состава.
3. Из правой части уравнения определить количество продуктов взрыва.
4. По формуле (5.1) найти максимальное давление взрыва для данной паровоздушной смеси.
5. Избыточное давление взрыва данной смеси найти по формуле (5.2).

### **Пример 1**

Рассчитать максимальное и избыточное давление взрыва этилена в воздухе, если на момент взрыва давление и температура смеси составляли  $P_0 = 101\,325$  Па и  $T_0 = 293$  К, а температура взрыва 2800 К.

*Решение*

Максимальное давление взрыва будет иметь место при стехиометрическом составе этилено-воздушной смеси. Для определения стехиометрических коэффициентов записываем реакцию горения этилена в воздухе



Из уравнения реакции определяем количество исходной смеси стехиометрического состава

$$n_{см} = 1 + 3 + 3 \cdot 3,76 = 15,3 \text{ кмоль}$$

и количество продуктов взрыва

$$n_{нв} = 2 + 2,5 + 3 \cdot 3,76 = 15,3 \text{ кмоль.}$$

Максимальное давление взрыва определяем по формуле (5.1)

$$P_{max} = \frac{P_0 \cdot T_{вз} \cdot n_{нв}}{T_0 \cdot n_{см}} = \frac{101325 \cdot 2800 \cdot 15,3}{293 \cdot 15,3} = 9,68 \cdot 10^5 \text{ Па} = 0,97 \text{ МПа.}$$

Избыточное давление взрыва этилена в воздухе

$$\Delta P = P_{max} - P_0 = 9,68 \cdot 10^5 - 1,01 \cdot 10^5 = 8,67 \cdot 10^5 \text{ Па} = 0,87 \text{ МПа.}$$

Задача решена.

### Б) Давление взрыва вещества в конденсированной фазе

Порядок решения задачи:

1. Определить объем продуктов взрыва 1 кг ВВ до расширения по плотности взрывчатого вещества.
2. Составить уравнение реакции взрывчатого разложения.
3. Определить число молей газообразных продуктов взрывчатого разложения 1 кг взрывчатого вещества по формуле

$$n_{нв} = \frac{1000}{\mu} \cdot (n_{H_2O} + n_{CO} + n_{N_2}).$$

4. Вычислить коэффциент продуктов взрывчатого разложения.
5. Определить величину давления продуктов взрыва.

### Пример 2

Рассчитать максимальное и избыточное давление взрыва 1 кг нитротолуола  $C_7H_7NO_2$ , если плотность взрывчатого вещества  $\rho_{вв} = 900 \text{ кг/м}^3$  и его температура  $T_0 = 293 \text{ К}$ , а температура взрыва  $3 \cdot 100 \text{ К}$ .

*Решение*

Определяем объем продуктов взрыва 1 кг нитротолуола перед началом их расширения

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{1}{900} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3,$$

а молярная масса нитротолуола

$$\mu = 7 \cdot 12 + 7 \cdot 1 + 1 \cdot 14 + 2 \cdot 16 = 137 \text{ г/моль.}$$

Уравнение реакции взрывчатого разложения нитротолуола имеет вид  $C_7H_7NO_2 + 7,75O_2 + 7,75 \cdot 3,76N_2 \rightarrow 7CO_2 + 3,5H_2O + 0,5N_2 + 7,75 \cdot 3,76N_2.$

Определяем число молей газообразных продуктов взрывчатого разложения 1 кг нитротолуола

$$n_{нв} = \frac{1000}{\mu} \cdot (n_{H_2O} + n_{CO_2} + n_{N_2}) = \frac{1000}{137} \cdot (3,5 + 7 + 0,5 + 7,75 \cdot 3,76) = 293 \text{ моль.}$$

и число молей взрывчатого вещества в 1 кг нитротолуола

$$n_{\text{вс}} = \frac{1000}{\mu} = \frac{1000}{137} = 7,3.$$

Начальный объем продуктов взрывчатого разложения

$$V_0 = 22,4 \cdot \frac{n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{CO}_2} + n_{\text{N}_2}}{n_{\text{вс}} \cdot \mu} = 22,4 \cdot \frac{3,5 + 7 + 0,5 + 7,75 \cdot 3,76}{7,3 \cdot 137} = 0,9 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Вычисляем коэфф. объем продуктов взрывчатого разложения

$$\alpha = 0,001 \cdot V_0 = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Рассчитываем давление продуктов взрыва 1 кг нитротолуола

$$P_{\text{max}} = \frac{n_{\text{вс}} \cdot R \cdot T_{\text{взр}}}{V - \alpha} = \frac{293 \cdot 8,314 \cdot 3100}{(1,1 - 0,9) \cdot 10^{-3}} = 3,77 \cdot 10^{10} \text{ Па}.$$

Задача решена.

### В) Определение тротилового эквивалента взрыва

Порядок решения задачи:

1. Определить молярную массу взрывчатого вещества.
2. Определить нижнюю теплоту сгорания взрывчатого вещества по формуле Менделеева (практическое занятие № 4, А)
3. Выбрать значение коэффициента  $\gamma$  в зависимости от вида взрывчатого вещества и условий взрыва.
4. По формуле (5.3) определить тротильный эквивалент взрыва.

### Пример 3

В результате разрушения технологической емкости поступило в помещение и полностью испарилось 15 кг бутилового спирта  $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$ . Определить тротильный эквивалент взрыва данной паровоздушной смеси.

*Решение*

Определяем молярную массу бутилового спирта

$$\mu = 4 \cdot 12 + 10 \cdot 1 + 1 \cdot 16 = 74 \text{ кг/кмоль}.$$

Далее производим расчет процентного состава каждого химического элемента в бутиловом спирте

$$\omega_{\text{C}} = \frac{4 \cdot 12}{74} \cdot 100\% = 64,9\%; \quad \omega_{\text{H}} = \frac{10 \cdot 1}{74} \cdot 100\% = 13,5\%;$$

$$\omega_{\text{O}} = \frac{1 \cdot 16}{74} \cdot 100\% = 21,6\%.$$

Находим низшую теплоту сгорания нитробензола по формуле Менделеева

$$Q_{\text{H}} = 339,4 \cdot \omega_{\text{C}} + 1257 \cdot \omega_{\text{H}} - 108,9 \cdot [(\omega_{\text{O}} + \omega_{\text{N}}) - \omega_{\text{S}}] - 25,1 \cdot (9\omega_{\text{F}} - \omega_{\text{W}}) = . \\ = 339,4 \cdot 64,9 + (1257 - 25,1 \cdot 9) \cdot 13,5 - 108,9 \cdot 21,6 = 33\,594,7 \text{ кДж/кг}.$$

Бутиловый спирт относится к легковоспламеняющимся жидкостям, поэтому принимаем значение коэффициента  $\gamma = 0,3$ . Тротильный эквивалент взрыва

$$M_{\text{ТНТ}} = \frac{0,4}{0,9} \cdot \frac{Q_{\text{H}} m \gamma}{Q_{\text{ТНТ}}} = \frac{0,4}{0,9} \cdot \frac{33\,594,7 \cdot 15 \cdot 0,3}{4\,240} = 15,8 \text{ кг}.$$

Задача решена.

### Задание к самостоятельной работе № 5

Рассчитать максимальное и избыточное давление взрыва, произошедшего вследствие разрушения технологической емкости, полного испарения легковоспламеняющейся жидкости и последующего взрыва образовавшейся парогазовой смеси. Также определить тротиловый эквивалент взрыва смеси. Данные для расчета взять из табл. 5.1

Таблица 5.1 – Исходные данные к самостоятельной работе № 5

Вариант	Вещество	Масса, кг	Условия взрыва
1	Диэтиловый эфир $(C_2H_5)_2O$	2	$T_{вз} = 1480$ К, $P_0 = 103\ 300$ Па, $T_0 = 293$ К
2	Октиловый спирт $C_8H_{18}O$	2,5	$T_{вз} = 450$ К, $P_0 = 99\ 300$ Па, $T_0 = 293$ К
3	Анилин $C_6H_7N$	3	$T_{вз} = 3300$ К, $P_0 = 100\ 000$ Па, $T_0 = 300$ К
4	Нитробензол $C_6H_5NO_2$	3,5	$T_{вз} = 2250$ К, $P_0 = 101\ 200$ Па, $T_0 = 290$ К
5	Диметиловый эфир $(CH_3)_2O$	4	$T_{вз} = 3100$ К, $P_0 = 99\ 200$ Па, $T_0 = 300$ К
6	Нитротолуол $C_7H_7NO_2$	4,5	$T_{вз} = 3330$ К $P_0 = 105\ 200$ Па $T_0 = 330$ К
7	Этилацетат $C_4H_8O_2$	5	$T_{вз} = 3250$ К, $P_0 = 100\ 300$ Па, $T_0 = 270$ К
8	Ацетон $C_3H_6O$	2,7	$T_{вз} = 2285$ К, $P_0 = 103\ 300$ Па, $T_0 = 285$ К
9	Винилхлорид $C_2H_3Cl$	5,2	$T_{вз} = 2955$ К, $P_0 = 102\ 500$ Па, $T_0 = 295$ К
10	Диэтиламин $C_4H_{11}N$	5,0	$T = 300$ К, $P = 103\ 300$ Па, $T_{вз} = 285$ К
11	Ангидрид уксусный $C_4H_6O_3$	3,5	$T_{вз} = 2250$ К, $P_0 = 101\ 200$ Па, $T_0 = 290$ К

Продолжение таблицы 1

Вариант	Вещество	Масса, кг	Условия взрыва
12	Ацетальдегид $CH_3CHO$	6	$T_{вз} = 3100$ К, $P_0 = 99\ 200$ Па, $T_0 = 300$ К
13	Хлорбензол $C_6H_5Cl$	5,5	$T_{вз} = 3330$ К $P_0 = 105\ 200$ Па, $T_0 = 330$ К
14	Толуол $C_7H_8$	7	$T_{вз} = 2285$ К, $P_0 = 103\ 300$ Па, $T_0 = 285$ К
15	Бензол $C_6H_6$	5	$T_{вз} = 2955$ К, $P_0 = 102\ 500$ Па, $T_0 = 295$ К

## РАЗДЕЛ 6. УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

### 6.1 Ударная волна, ее структура и параметры

**Ударная волна** – область сжатия с резким скачком давления, плотности и температуры на переднем фронте, распространяющаяся во все стороны от центра взрыва со сверхзвуковой скоростью. Ударные волны могут распространяться во всех средах, но наибольший практический интерес представляют воздушные ударные волны.

Воздушная ударная (взрывная) волна имеет четыре характерные зоны:

- *центр взрыва* – совпадает с положением взрывчатого вещества в момент его подрыва;
- *газообразные продукты взрыва* – прилегают со всех сторон к центру взрыва. Занимаемый ими объем непрерывно растет со временем;
- *зона сжатого воздуха* – непосредственно примыкает к объему, занимаемому в данный момент газообразными продуктами взрыва;
- *фронт ударной волны* – внешняя граница сжатого слоя воздуха, перемещающаяся со сверхзвуковой скоростью от центра взрыва.

На рис. 6.1 *а* и *б* показана структура взрывной ударной волны для случаев воздушного и наземного взрывов.

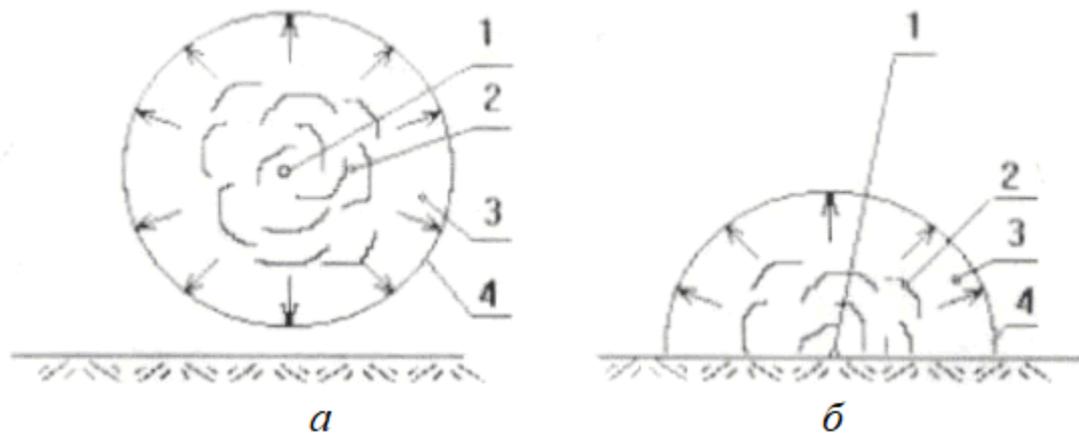


Рисунок 6.1 – Схема образования ударной волны: *а* – при воздушном взрыве, *б* – при наземном взрыве; 1 – центр взрыва, 2 – газообразные продукты взрыва, 3 – зона сжатого воздуха, 4 – фронт ударной волны

Механизм образования ударной волны можно представить следующим образом:

1. При подрыве взрывчатого вещества образуется большое количество газообразных продуктов взрыва, находящихся под давлением в несколько десятков атмосфер.
2. Избыток давления приводит к практически мгновенному расширению продуктов взрыва, наносящих удар по прилегающим слоям воздуха, который сжимается и нагревается.
3. Продукты взрыва при расширении вытесняют окружающий воздух и образуют вокруг себя зону сжатого воздуха, которая воздействует на следующие слои воздуха, сжимая и нагревая их.

4. Таким образом, от слоя к слою фронт ударной волны перемещается со сверхзвуковой скоростью.

Ударная волна имеет две фазы (рис. 6.2):

- фаза сжатия – давление ударной волны выше атмосферного, а его максимальное значение имеет место во фронте волны;
- фаза разрежения – давление ударной волны ниже атмосферного.

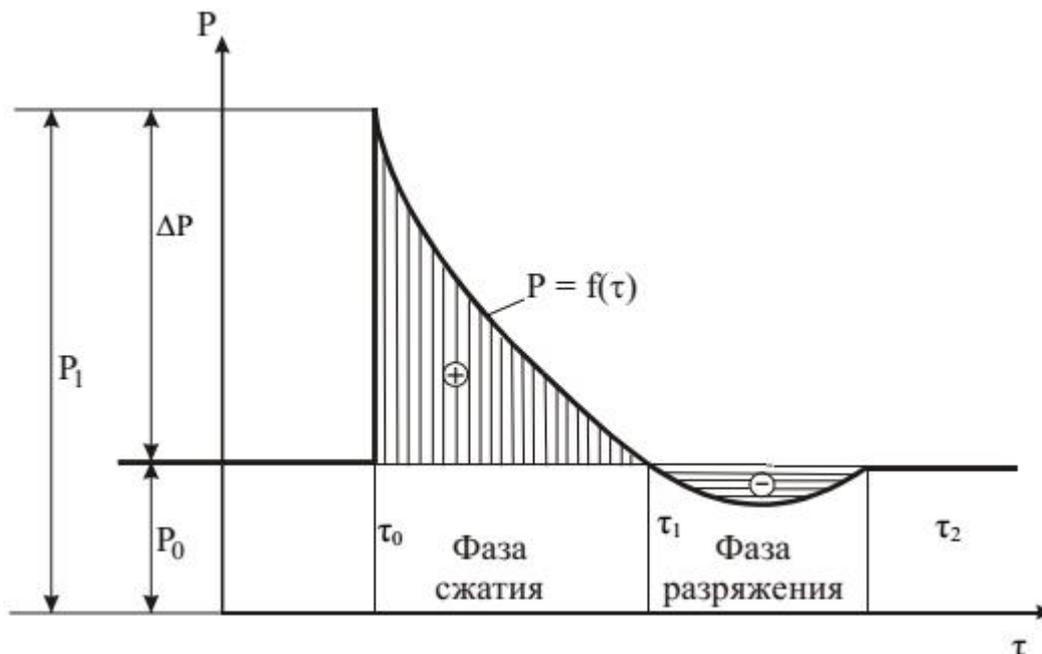


Рисунок 6.2 – Схема изменения давления при прохождении взрывной волны:  $\tau_0$  – момент прихода ударной волны в данную точку пространства;  $\tau_1$  – момент снижения давления до атмосферного;  $\tau_2$  – момент окончания действия ударной волны

Из рис. 6.2 видно, что в момент прихода взрывной волны давление достигает максимального значения и начинает падать по мере удаления фронта, опускаясь ниже атмосферного в фазе разрежения.

Ударная волна оказывает поражающее действие на людей и разрушающее – на здания, сооружения и другие инженерные объекты. Ее основные параметры:

1. Избыточное давление во фронте – разность между абсолютным давлением во фронте волны  $P_{max}$  и атмосферным давлением  $P_{атм}$

$$\Delta P_{\phi} = P_{max} - P_{атм}. \quad (6.1)$$

Избыточное давление в данной точке пространства  $z$  зависит от расстояния до центра взрыва  $R$  и мощности самого взрыва

$$\Delta P_z = f\left(M_{ТНТ}, \frac{1}{R}\right),$$

где  $M_{ТНТ}$  – тротиловый эквивалент взрывчатого вещества, кг

Избыточное давление во фронте ударной волны  $\Delta P_{max}$ , кПа определяется эмпирической формулой

$$\Delta P_{\phi} = 83 \cdot \sqrt[3]{\frac{M_{ТНТ}}{R}} + \sqrt[3]{\left(\frac{M_{ТНТ}}{R}\right)^2} + 686 \cdot \frac{M_{ТНТ}}{R^3}. \quad (6.2)$$

2. Скорость движения ударной волны  $v_в$ , м/с – расстояние, проходимое фронтом ударной волны в единицу времени. Она зависит от интенсивности волны и может быть определена по формуле

$$v_в = 340 \cdot \sqrt{1 + 0,83 \Delta P_{max}} . \quad (6.3)$$

3. Время действия ударной волны  $t_в$ , с – время прохождения фазы сжатия, то есть действия избыточного давления. Его величина находится по формуле

$$t_в = 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[6]{mR^3} . \quad (6.4)$$

где  $m$  – масса взорвавшейся газовой среды, кг;

4. Размер безопасной зоны по действию давления ударной воздушной волны взрыва  $R_{без}$ , м, выражается через величину тротилового эквивалента взрыва  $M_{ТНТ}$  по формуле

$$R_{без} = 15 \cdot \sqrt[3]{M_{ТНТ}} . \quad (6.5)$$

5. Зона разрушений – площадь, представляющая собой окружность с центром в центре взрыва. Радиус зоны разрушений определяется по формуле

$$R_{раз} = K \cdot \frac{\sqrt[3]{M_{ТНТ}}}{\sqrt[6]{1 + \left(\frac{3180}{M_{ТНТ}}\right)^2}} . \quad (6.6)$$

Коэффициент пропорциональности  $K$  определяется в зависимости от избыточного давления во фронте ударной волны  $\Delta P_ф$  (табл. 6.1).

Таблица 6.1 –  $K$  определению коэффициента  $K$

Зона разрушения	$\Delta P_ф$ , кПа	$K$
1	больше 100	3,8
2	70	5,6
3	28	9,6
4	14	28
5	меньше 2,0	56

## 6.2 Отражение ударных волн от преград

В реальных условиях ударные волны часто наталкиваются на препятствия, в результате чего их характер ее действия меняется: давление и импульс, сообщаемые препятствию, увеличивается по сравнению с импульсом свободно распространяющейся ударной волны. В момент контакта с препятствием передний слой ударной волны тормозится и скорость потока в этом слое становится равной нулю, что приводит к дополнительному повышению давления до значения  $P_{отр}$  (рис. 6.3).

На преграду внезапно начинает действовать давление, состоящее из двух составляющих:

- статическое – давление  $P_1$  во фронте ударной волны;

- *динамическое* – давление, обусловленное резким торможением перед преградой движущихся масс воздуха и переходом их кинетической энергии в энергию давления.

Наиболее важна для оценки разрушающего действия ударных волн величина избыточного давления отражения  $\Delta P_{omp}$ , которая определяется по следующей формуле

$$\Delta P_{i\delta\delta} = (\Delta P_{\delta} + P_0) \cdot \frac{3\hat{E} - 1}{\hat{E} - 1} \cdot \frac{(\Delta P_{\delta} + P_0) - P_0}{(\Delta P_{\delta} + P_0) + \frac{\hat{E} + 1}{\hat{E} - 1} \cdot P_0}, \quad (6.7)$$

где  $P_0 = 101$  кПа – атмосферное давление;  $\Delta P_1$  – избыточное давление во фронте идущей волны, кПа;  $K$  – коэффициент, определяемый по табл. 6.1.

В зависимости от условий воздействия ударных волн на ограждающие конструкции зданий их разрушение определяется следующими факторами:

- избыточным давлением на фронте падающей ударной волны;
- избыточным давлением на фронте отраженной ударной волны;
- скоростным напором или импульсом скоростного напора ударной волны.

В зависимости от угла падения ударной волны на препятствие волна может отражаться непосредственно на поверхности препятствия или на некотором расстоянии от него. Во последнем случае отражение называется трехволновым, так как возникает третья ударная волна, соединяющая падающую и отраженную волны с поверхностью препятствия.

*Число Маха* – отношение скорости течения  $u$  к скорости звука, важная характеристика движения среды при взрыве

$$M = \frac{u}{v_{зв}}, \quad (6.8)$$

где  $v_{зв} \approx 340$  м/с – скорость звука в воздухе.

При сверхзвуковом течении среды число Маха больше единицы, при дозвуковом – меньше.

Ударные волны имеют следующие характерные особенности:

- скорость распространения ударных волн больше скорости звука;
- во фронте ударной волны параметры состояния и движения среды (давление и плотность, скорость и импульс) изменяются скачком;
- ударные волны сопровождаются перемещением среды в направлении распространения фронта возмущения;
- скорость ударной волны зависит от ее интенсивности, что не наблюдается для звуковых волн;
- ударная волна не имеет периодического характера, а распространяется в виде одиночного скачка уплотнения.

### 6.3 Последствия действия ударных волн на сооружения и человека

Различают два вида действия взрыва:

- *фугасное* (общее) действие – вызывается ударными волнами на некотором расстоянии от центра взрыва, выражается в разрушениях зданий,

выбросе и дроблении значительных объемов грунта. Основная часть энергии взрыва тратится на фугасное действие взрыва;

- *бризантное действие* – интенсивное дробление и деформация продуктами детонации тел, непосредственно примыкающих к центру взрыва.

При взрыве ударные волны создают на здания и сооружения очень интенсивную и кратковременную динамическую нагрузку. По характеру последствия действия ударных волн принято различать четыре вида разрушения зданий:

1. *Полные разрушения* – обрушены все перекрытия и разрушены все несущие конструкции, восстановление здания невозможно. В самом здании оборудование и другая техника не подлежит восстановлению.

2. *Сильные разрушения* – имеют место значительные деформации несущих конструкций здания, разрушена большая часть перекрытий и стен. Оборудование и механизмы большей частью разрушены и значительно деформированы. Восстановление здания возможно, но чаще всего нецелесообразно. Более рационально возведение нового здания с использованием сохранившейся конструкции пола (фундамент и подвалы).

3. *Средние разрушения* – в зданиях и сооружениях разрушены исключительно вспомогательные конструкции (легкие стены, перегородки, окна, двери), несущие конструкции, перекрытия и подвалы не разрушены. Могут наблюдаться трещины в наружных стенах и вывалы в отдельных местах, часть помещений пригодна к эксплуатации. Для полного восстановления здания требуется капитальный ремонт.

4. *Слабые разрушения* – в зданиях и сооружениях разрушена часть перегородок, дверных и оконных проемов. Оборудование имеет незначительные деформации. Для полного восстановления здания требуется текущий ремонт.

Зоны разрушений от фугасного и бризантного действия взрыва схематически представлены на рис. 6.3.

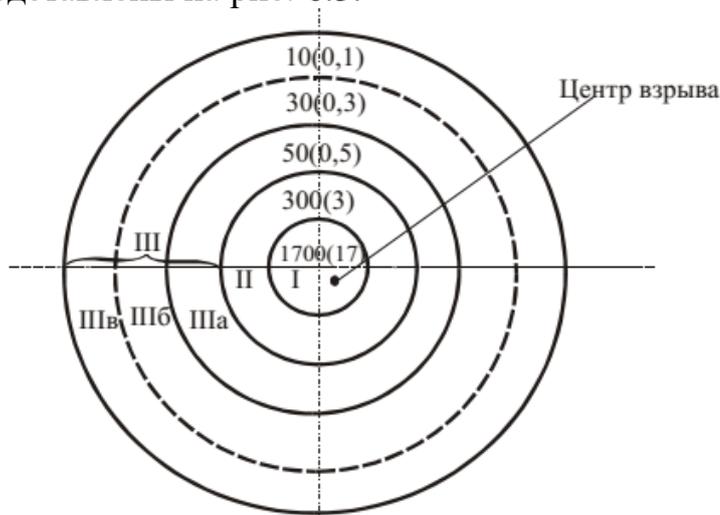


Рисунок 6.3 – Зоны действия взрыва [8]: I – продуктов взрыва, полное разрушение; II – фугасного действия, полное разрушение; III – ударной волны: IIIа – зона сильных разрушений; IIIб – зона средних разрушений; IIIв – зона слабых разрушений

Поражающие факторы взрыва (ударная волна и разлетающиеся продукты взрыва) способны наносить человеку травмы различной степени тяжести, в том числе и смертельные.

В зонах полного разрушения *I* и *II* наблюдается полное поражение людей, все травмы являются смертельными. В зоне *III* поражение людей вызывается как непосредственным, так и косвенным воздействием ударной волны: при непосредственном воздействии УВ основной причиной травм является мгновенное повышение давления, а при косвенном – скоростной напор оказывает метательное действие. Характер и тяжесть поражения людей зависит от параметров ударной волны и положения человека в момент взрыва. Наиболее тяжелые поражения получают люди, находящиеся в момент прихода УВ вне укрытия в положении стоя.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Какую структуру имеет воздушная ударная волна?
2. Посредством чего избыточное давление взрыва передается из одной точки пространства в другую?
3. В чем причина возникновения фазы разрежения при прохождении ударной волны?
4. В чем состоит отличие воздушных ударных волн от звуковых?
5. От каких факторов зависит степень разрушения зданий при взрыве?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 6  
ОЦЕНКА РАЗРУШАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВНОЙ ВОЛНЫ

Порядок решения задачи:

1. Определить низшую теплоту сгорания взрывчатого вещества  $Q_H$ .
2. По формуле (5.3) найти тротильный эквивалент взрыва.
3. Вычислить избыточное давление  $\Delta P$  от взрыва данной массы взрывчатого вещества.
4. По табл. 6.1 определить значение безразмерного коэффициента  $K$ .
5. Радиус зоны разрушений вычислить по формуле (6.6).

**Задача 1**

Определить радиус зоны разрушений, вызванных разгерметизацией емкости с последующим испарением и взрывом 20 кг этиленгликоля  $C_2H_5O_2$ . На момент взрыва давление и температура образовавшейся паровоздушной смеси составляли  $P_0 = 101\,325$  Па и  $T_0 = 293$  К, а температура взрыва – 2 500 К. Оценить возможность разрушения при взрыве технологического оборудования, рассчитанного на предельное избыточное давление  $P_{пред} = 2 \cdot 10^3$  кПа.

*Решение*

Определяем молярную массу этиленгликоля

$$\mu = 2 \cdot 12 + 5 \cdot 1 + 2 \cdot 16 = 61 \text{ кг/кмоль.}$$

Далее производим расчет процентного состава каждого химического элемента в бутиловом спирте

$$\omega_C = \frac{2 \cdot 12}{61} \cdot 100\% = 39,3\%; \quad \omega_H = \frac{5 \cdot 1}{61} \cdot 100\% = 8,2\%;$$

$$\omega_O = \frac{2 \cdot 16}{61} \cdot 100\% = 52,5\%.$$

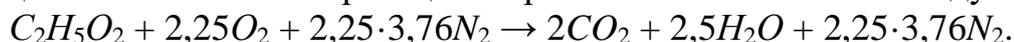
Находим низшую теплоту сгорания нитробензола по формуле Менделеева

$$Q_H = 339,4 \cdot \omega_C + 1257 \cdot \omega_H - 108,9 \cdot [(\omega_O + \omega_N) - \omega_S] - 25,1 \cdot (9\omega_I - \omega_W) = . \\ = 339,4 \cdot 39,3 + (1257 - 25,1 \cdot 9) \cdot 8,2 - 108,9 \cdot 52,5 = 16\,076,2 \text{ кДж/кг.}$$

Этиленгликоль относится к легковоспламеняющимся жидкостям, поэтому принимаем значение безразмерного коэффициента  $\gamma = 0,3$ . Тротильный эквивалент взрыва емкости с этиленгликолем

$$\dot{V} \cdot \dot{V}_0 = \frac{0,4}{0,9} \cdot \frac{Q_f \cdot \dot{V} \cdot \gamma}{Q_{\dot{V}_0}} = \frac{0,4}{0,9} \cdot \frac{16076,2 \cdot 20 \cdot 0,3}{4240} = 10,1 \text{ кг.}$$

Максимальное давление взрыва будет иметь место при стехиометрическом составе паровоздушной смеси, образовавшейся при разгерметизации емкости. Для определения стехиометрических коэффициентов записываем реакцию горения этиленгликоля в воздухе



Из уравнения реакции определяем количество исходной смеси стехиометрического состава

$$n_{см} = 1 + 2,25 + 2,25 \cdot 3,76 = 11,7 \text{ кмоль}$$

и количество продуктов взрыва

$$n_{нв} = 2 + 2,5 + 2,25 \cdot 3,76 = 13,0 \text{ кмоль.}$$

Максимальное давление взрыва определяем по формуле (5.1)

$$P_{max} = \frac{P_0 \cdot T_{вз} \cdot n_{нв}}{T_0 \cdot n_{см}} = \frac{101325 \cdot 2500 \cdot 13,0}{293 \cdot 11,7} = 9,61 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Избыточное давление взрыва этиленгликоля в воздухе

$$\Delta P = P_{max} - P_0 = 9,61 \cdot 10^5 - 1,01 \cdot 10^5 = 8,60 \cdot 10^5 \text{ Па} = 860 \text{ кПа.}$$

Поскольку

$$\Delta P < P_{пред} = 2000 \text{ кПа,}$$

то технологическое оборудование не будет разрушено.

С помощью табл. 6.1 по данному значению  $\Delta P$  находим значение безразмерного коэффициента пропорциональности

$$K = 3,8.$$

Определяем радиус зоны разрушений, вызванных взрывом данной паровоздушной смеси

$$R_{\delta\alpha\zeta} = \hat{E} \cdot \frac{\sqrt[3]{\dot{I} \cdot \dot{O}}}{\sqrt[6]{1 + \left(\frac{3180}{\dot{I} \cdot \dot{O}}\right)^2}} = 3,8 \cdot \frac{\sqrt[3]{10,1}}{\sqrt[6]{1 + \left(\frac{3180}{10,1}\right)^2}} = 2,7 \text{ м.}$$

Задача решена.

### Задание к самостоятельной работе № 6

Рассчитать радиус зоны разрушения, произошедшего вследствие разгерметизации технологической емкости, полного испарения легковоспламеняющейся жидкости и последующего взрыва образовавшейся парогазовой смеси. Оценить возможность разрушения при взрыве технологического оборудования, рассчитанного на предельное избыточное давление  $P_{пред} = 1,2 \cdot 10^3$  кПа. Данные для расчета взять из табл. 1

Таблица 6.1 – Исходные данные к самостоятельной работе № 6

Вариант	Вещество	Масса, кг	Условия взрыва
1	Метилэтилкетон $C_4H_8O$	4,0	$T_{вз} = 1500 \text{ К,}$ $P_0 = 93300 \text{ Па,}$ $T_0 = 373 \text{ К}$
2	Фталевый ангидрид $C_8H_4O$	4,5	$T_{вз} = 2000 \text{ К,}$ $P_0 = 95500 \text{ Па}$ $T_0 = 383 \text{ К}$
3	Ангидрид уксусный $C_4H_6O_3$	3,5	$T_{вз} = 2050 \text{ К,}$ $P_0 = 101200 \text{ Па,}$ $T_0 = 290 \text{ К}$

Продолжение таблицы 6.1

Вариант	Вещество	Масса, кг	Условия взрыва
4	Формальдегид $CH_2O$	2,5	$T_{\text{вз}} = 1\ 850\ \text{К}$ , $P_0 = 100\ 100\ \text{Па}$ , $T_0 = 300\ \text{К}$
5	Хлорэтан $C_2H_5Cl$	3,5	$T_{\text{вз}} = 1\ 900\ \text{К}$ , $P_0 = 90\ 000\ \text{Па}$ $T_0 = 293\ \text{К}$
6	Диэтиламин $C_4H_{11}N$	5,0	$T_{\text{вз}} = 1\ 885\ \text{К}$ , $P_0 = 103\ 300\ \text{Па}$ , $T_0 = 300\ \text{К}$
7	Диэтиловый эфир $(C_2H_5)_2O$	2	$T_{\text{вз}} = 1\ 500\ \text{К}$ , $P_0 = 103\ 300\ \text{Па}$ , $T_0 = 290\ \text{К}$
8	Октиловый спирт $C_8H_{18}O$	2,5	$T_{\text{вз}} = 1\ 450\ \text{К}$ , $P_0 = 99\ 300\ \text{Па}$ , $T_0 = 298\ \text{К}$
9	Анилин $C_6H_7N$	3	$T_{\text{вз}} = 3\ 300\ \text{К}$ , $P_0 = 100\ 500\ \text{Па}$ , $T_0 = 290\ \text{К}$
10	Нитробензол $C_6H_5NO_2$	3,5	$T_{\text{вз}} = 2250\ \text{К}$ , $P_0 = 101\ 200\ \text{Па}$ , $T_0 = 290\ \text{К}$
11	Диметиловый эфир $(CH_3)_2O$	4	$T_{\text{вз}} = 3\ 100\ \text{К}$ , $P_0 = 99\ 200\ \text{Па}$ , $T_0 = 295\ \text{К}$
12	Нитротолуол $C_7H_7NO_2$	4,5	$T_{\text{вз}} = 3\ 330\ \text{К}$ $P_0 = 105\ 200\ \text{Па}$ $T_0 = 280\ \text{К}$
13	Этилацетат $C_4H_8O_2$	5	$T_{\text{вз}} = 3250\ \text{К}$ , $P_0 = 100\ 300\ \text{Па}$ , $T_0 = 270\ \text{К}$
14	Ацетон $C_3H_6O$	3,0	$T_{\text{вз}} = 2\ 085\ \text{К}$ , $P_0 = 103\ 300\ \text{Па}$ , $T_0 = 295\ \text{К}$
15	Винилхлорид $C_2H_3Cl$	5,5	$T_{\text{вз}} = 2\ 055\ \text{К}$ , $P_0 = 102\ 500\ \text{Па}$ , $T_0 = 298\ \text{К}$

## РАЗДЕЛ 7. ВЗРЫВЫ ПЫЛЕВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

### 7.1 Классификация и физико-химические характеристики пыли

Пыль является сопровождающим компонентом всех технологических процессов, связанных с измельчением или шлифованием материалов, шелушением и перемещением сыпучих масс. При этом образующаяся пылевоздушная смесь представляет повышенную взрывопожароопасность.

**Пыль** – измельченные частицы вещества, находящиеся во взвешенном (аэрозоли) или осевшем (аэрогели) состоянии. Интервал дисперсности пылевых аэрозолей лежит в диапазоне от 1 нм до 1 см. Большие частицы быстро оседают под действием силы тяжести, а меньшие имеют крайне малое время самостоятельного существования, осаждаюсь на более крупных образованиях.

**Пылевидный материал** – совокупность мелкораздробленных частиц, на создание которых и направлен технологический процесс. К таким материалам относится мука, сахарная пудра и т.д.

По своему происхождению пыль бывает:

- *естественного происхождения* – образуется в результате эрозии почвы, при выветривании горных пород или поступлении в воздух органических пылевидных частиц (пыльцы, споры растений);
- *промышленная* – возникает непосредственно в процессе производства, при этом каждому виду производства соответствует характерный только для него вид пыли.

В зависимости от исходного материала пыль делится на:

- *органическую* – растительного (мучная, сахарная, табачная и др.) и животного (шерстяная, костная) происхождения;
- *неорганическую* – образовавшуюся при измельчении материалов и горных пород. Такая пыль, в свою очередь, подразделяется на минеральную (кварцевую, цементную и др.) и металлическую (стальную, медную, алюминиевую и др.).

В зависимости от величины измельченных частиц пыль бывает *монодисперсная* (состоит из близких по размерам частиц) и *полидисперсная* – в ее состав которых входят частицы разной величины. Практически все пыли являются полидисперсными.

**Дисперсность** – характеристика, описывающая распределение частиц пыли по размерам. Свойства вещества существенно изменяются при его измельчении, поскольку при этом многократно увеличивается его суммарная площадь поверхности, что приводит к увеличению его:

- химической активности – вещества, которые в обычных условиях не взаимодействуют с кислородом воздуха, в измельченном состоянии принимают активное участие в окислительных реакциях;
- физической активности – измельченные вещества растворяются во много раз быстрее, чем исходный материал.

Дисперсность пыли также определяет ее способность находиться во взвешенном состоянии: мелкодисперсная пыль оседает крайне медленно, а

ультрадисперсная способна находиться во взвешенном состоянии неограниченно долго.

Дисперсность аэрозолей характеризует *медианный диаметр*  $d_{50}$  – размер частиц, разделяющий массу аэрозоля на две равные части: массы частиц мельче и крупнее  $d_{50}$  составляют по 50% всей массы пыли.

Пылевидные материалы по дисперсионным характеристикам подразделяют на пять групп:

- *I* – очень крупнодисперсная пыль (уголь), медианный диаметр частиц  $d_{50}$  более 150 мкм;

- *II* – крупнодисперсная пыль (мелкий песок), медианный диаметр частиц  $d_{50} = 40 \dots 150$  мкм;

- *III* – среднедисперсная пыль (цемент), медианный диаметр частиц  $d_{50} = 10 \dots 40$  мкм;

- *IV* – мелкодисперсная пыль (взвешенная атмосферная пыль), медианный диаметр частиц  $d_{50} = 1 \dots 10$  мкм;

- *V* – ультрадисперсная пыль, медианный диаметр частиц  $d_{50}$  менее 1 мкм.

Пыль негативно влияет на здоровье человека, она способна оказывать механическое (повреждение слизистых оболочек) и химическое (отравление) воздействие. Кроме того, пыль выступает транспортной средой для попадания внутрь организма бактерий и микробов, а также короткоживущих радиоактивных изотопов, распад которых формирует дозу внутреннего облучения человека. Наибольший вред наносят частицы пыли диаметром менее 10 мкм, которые проникают в верхние дыхательные пути и легкие, вызывая повреждение легочной ткани и респираторные заболевания [10, 11].

*Коагуляция пыли* – процесс укрупнения взвешенных в воздухе частиц пыли с течением времени под действием различных физических факторов. Наиболее подвержены коагуляции мелкие фракции пыли. В зависимости от лежащих в основе данного явления физических процессов, коагуляция бывает:

- *естественная* – происходит под действием броуновского движения и гравитационных сил;

- *искусственная* – вызвана внешними воздействиями, такими как ионизация или электризация пылевоздушной среды.

## **7.2 Характеристики пожаровзрывоопасности пылевоздушных смесей**

Из взрывов пылевоздушных смесей около половины приходится на работы с зерном, мукой и сахаром; немногим менее 10% – на взрывы металлической пыли, еще около 5% – на взрывы угольной пыли.

Взрыв пыли происходит при мгновенном соединении горючей части пыли с кислородом воздуха с выделением большого количества тепла и газообразных продуктов, которые расширяются при нагреве и образуют взрывную волну. Сила и интенсивность взрыва пыли зависят от концентрации пыли и ее дисперсности. Мелкодисперсная пыль имеет более низкую температуру самовоспламенения и более широкий интервал между нижним и верхним концентрационными пределами взрываемости. При малых концентрациях расстояние между частицами пыли велико и переноса

пламени от частицы к частице не происходит, поэтому взрыв не распространяется по объему. Большое количество пыли также препятствует распространению взрыва, поскольку в этом случае в смеси содержится слишком мало кислорода.

Возбуждение взрыва пыли возможно только при одновременном выполнении следующих условий:

- концентрация пыли в воздухе находится между нижним и верхним концентрационными пределами;

- имеется источник зажигания достаточной мощности. Наиболее распространенными источниками зажигания являются искры от ударов и трения, разряды статического электричества, раскаленные поверхности технологического оборудования;

- концентрация кислорода (воздуха) достаточна для обеспечения процесса горения пылегазовой смеси.

Перечень веществ, способных к образованию взрывоопасной пыли, чрезвычайно велик, причем в нем присутствуют вещества, безопасные в неизмельченном состоянии. Уровень взрывоопасности пыли, в первую очередь, характеризуется концентрационными пределами взрываемости.

*Нижний концентрационный предел взрываемости НКПВ, г/м<sup>3</sup>* – это минимальное содержание пыли в воздухе, при котором возможно возникновение и распространение взрыва по смеси на любое расстояние от места его возникновения.

*Верхний концентрационный предел взрываемости ВКПВ, г/м<sup>3</sup>* – это максимальное содержание пыли в воздухе, при котором возможно распространение взрыва по смеси на любое расстояние от места его возникновения.

Кроме того, важными характеристиками взрывоопасности пылегазовых смесей являются объемная плотность выделения энергии, максимальное давление при взрыве, скоростью нарастания давления при взрыве, максимально допустимым содержанием кислорода в пылевоздушной смеси, при котором пыль не воспламенится.

Максимальное давление пылевоздушной смеси также определяется условиями, в которых взрыв имел место:

- при взрыве в свободном объеме давление повышается незначительно, поскольку газообразные продукты взрыва могут беспрепятственно разлетаться во все стороны;

- в полностью замкнутом объеме взрыв аэровзвеси сопровождается повышением давления до максимально возможного;

- в полузамкнутом объеме величина повышения давления при взрыве зависит от суммарной площади проемов, через которые возможен выход ударных волн из объема.

Взрыв пылевоздушной смеси, в зависимости от комплекса внешних факторов, может происходить по одной из следующих стадий:

- *вспышка* – реакция, протекающая без повышения давления и образования сжатых газов;

- *хлопок* – взрыв смеси в ограниченном объеме с незначительным повышением давления при образовании высокотемпературных газообразных продуктов, но без разрушительных и травмирующих последствий и распространения на соседние области;

- *локальный взрыв* – повышение давления сверх допустимого значения характерно для локальной области производственного помещения;

- *развитой пылевой взрыв* – приводит к разрушению отдельного оборудования, сооружения или части ограждающих конструкций здания.

Данные режимы взрыва пылевоздушных смесей могут завершаться на одной стадии или переходить последовательно из одной режима в другую в различных сочетаниях, вызывая серию пылевоздушных взрывов с различными последствиями вплоть до катастрофических. Переходу локального взрыва в развитой также способствует наличие связи между технологическим оборудованием и отдельными помещениями (вентиляционные каналы, транспортные магистрали и коммуникации).

### 7.3 Расчетные параметры взрыва пылевоздушных смесей

Как уже было отмечено в п. 7.2, возможность взрыва пылевоздушной смеси определяется нижним концентрационным пределом взрываемости, который определяется по формуле

$$\varphi_n^{63} = \frac{800}{q_v}, \quad (7.1)$$

где  $q_v$  – удельная теплота взрыва пыли, кДж/кг.

Значения нижнего концентрационного предела взрываемости, удельной теплоты взрыва пыли и максимального давления при взрыве для наиболее распространенных видов пыли представлены в *Приложении 3*.

Масса пыли в тротиловом эквиваленте выражается формулой

$$m'_{\text{пыли}} = Zm \frac{q_v}{q_{\text{ТНТ}}}, \quad (7.2)$$

где  $m$  – масса пыли, кг;  $Z = 0,02 \dots 0,1$  – коэффициент участия пыли во взрыве в воздухе.

Избыточное давление при взрыве пыли в воздухе можно рассчитать по формуле (6.2). Радиус зон разрушения (полных, сильных, средних и слабых) при взрыве пылевоздушной смеси определяют по формуле

$$R = K \cdot \sqrt[6]{1 + \frac{3180}{m'_{\text{пыли}}}}, \quad (7.3)$$

где  $K$  – константа разрушений.

Для зоны полных разрушений  $K_1 = 4,7$ ; для зоны сильных разрушений  $K_2 = 6,4$ ; для зоны средних разрушений  $K_3 = 8,2$ ; для зоны слабых разрушений  $K_4 = 13,5$ .

Критическая масса пыли  $M_{кр}$ , при которой возможен взрыв пылевоздушной смеси

$$M_{кр} = \varphi_n^{63} V, \quad (7.4)$$

где  $V$  – объем помещения,  $\text{м}^3$ .

Время накопления взрывоопасной концентрации пыли в производственном помещении

$$t_{\text{вз}} = \frac{M_{\text{кр}}}{M_{\text{сут}}}, \quad (7.5)$$

где  $M_{\text{сут}}$  – количество пыли, которое накапливается за сутки в производственном помещении, кг.

После взрыва пылегазовой смеси в замкнутом или полужамкнутом объеме образуется воздушная ударная волна и поле осколков

$$E = E_{\text{уд}} + E_{\text{оск}},$$

причем энергия взрыва распределяется следующим образом

$$E_{\text{уд}} \approx 0,6E \text{ и } E_{\text{оск}} \approx 0,4E.$$

Радиус разлета продуктов взрыва  $r_{\text{нв}}$  определяется по формуле

$$r_{\text{нв}} = \sqrt[3]{\frac{3V}{2\pi}}. \quad (7.6)$$

### Вопросы для самоконтроля

1. В чем состоит различие между понятиями «пыль» и «пылевидный материал»?
2. Что понимают под дисперсностью пыли?
3. Частицы пыли каких размеров несут наибольший вред здоровью человека и почему?
4. Какие факторы определяют степень взрывопожароопасности пылевоздушных смесей?
5. В чем состоит различие между взрывами пылевоздушных смесей в свободных условиях и в замкнутом объеме?

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 7 ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ВЗРЫВА ПЫЛЕВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Порядок решения задачи:

1. Определить удельную теплоту взрыва  $Q_n$  данной пылевоздушной смеси по *Приложению В*.
2. Вычислить критическую массу пыли, при которой возможен взрыв, по формуле

$$m_{\text{кр}} = \frac{800 \cdot V}{q_v}.$$

3. По формуле (7.5) найти время, за которое будет достигнута взрывоопасная концентрации пыли в помещении.
4. Определяем фактическую концентрацию пыли в помещении пилорамы.
5. Найти избыточное давление в помещении, вызванное взрывом.
6. Определить радиус разлета продуктов взрыва по формуле (7.6).

### Задача 1

В помещении пилорамы с размерами  $30 \times 20 \times 4,5$  м за сутки накапливается 500 г сосновой пыли. Определить время накопления взрывоопасной концентрации пыли и последствия взрыва пылевоздушной смеси. Здание пилорамы способно выдерживать без разрушения избыточное давление до 40 кПа.

### Решение

По *Приложению В* находим удельную теплоту сгорания сосновой пыли

$$q_{yd} = 15,4 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг.}$$

Объем помещения пилорамы равен

$$V = a \cdot b \cdot h = 30 \cdot 20 \cdot 4,5 = 2700 \text{ м}^3.$$

Зная удельную теплоту сгорания и объем помещения, можно определить критическую массу пыли, при которой возможен взрыв

$$M_{кр} = \frac{800 \cdot V}{q_g} = \frac{800 \cdot 2700}{15,4 \cdot 10^3} = 140 \text{ кг.}$$

Тогда время, за которое будет достигнута взрывоопасная концентрации пыли в помещении пилорамы

$$t_{вз} = \frac{M_{кр}}{M_{сут}} = \frac{140}{0,5} = 280 \text{ суток.}$$

Взрыв пылевоздушной смеси возможен только в том случае, если фактическая концентрация пыли  $\varphi_{ф}$  будет больше нижнего концентрационного предела взрываемости  $\varphi_{н}^{вз}$ . Определяем фактическую концентрацию пыли в помещении пилорамы

$$\varphi_{ф} = \frac{M_{кр}}{V} = \frac{140}{2700} = 0,052 \text{ кг/м}^3.$$

По *Приложению В* находим нижний концентрационный предел взрываемости сосновой пыли

$$\varphi_{н}^{вз} = 0,051 \text{ кг/м}^3,$$

поэтому такая концентрация  $\varphi_{ф}$  является взрывоопасной.

Находим избыточное давление в помещении пилорамы, вызванное взрывом

$$\Delta P = \frac{M_{кр} \cdot q_{yd} \cdot \gamma}{V} - P_0 = \frac{140 \cdot 15,4 \cdot 10^3 \cdot 0,5}{2700} - 101 \cdot 10^3 = 208 \cdot 10^3 \text{ Па} = 208 \text{ кПа,}$$

где  $P_0 = 101$  кПа – атмосферное давление;  $\gamma = 0,5$  – коэффициент участия пыли в процессе взрыва.

Поскольку

$$\Delta P > P_{раз} = 40 \text{ кПа,}$$

то здание пилорамы будет разрушено и не подлежит восстановлению.

Определяем радиус разлета продуктов взрыва

$$r_{раз} = \sqrt[3]{\frac{3V}{2\pi}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 2700}{2 \cdot 3,14}} = 10,9 \text{ м.}$$

Задача решена.

### Задание к самостоятельной работе № 7

В производственном помещении с размерами  $a \times b \times c$  м за сутки накапливается  $M_{сут}$  пыли. Определить время накопления взрывоопасной концентрации пыли и последствия взрыва пылевоздушной смеси. Здание способно выдерживать без разрушения избыточное давление до 35 кПа. Данные для расчета взять из табл. 7.1

Таблица 7.1 – Исходные данные к самостоятельной работе № 7

Вариант	Тип пыли	Суточная масса пыли $M_{сут}$ , г	Размеры помещения $a \times b \times c$ , м
1	Антрацитовая	400	30×20×5
2	Торфяная	900	40×25×5
3	Печная (сажа)	250	20×8×4
4	Мучная	720	35×20×4,5
5	Сосновая	450	30×15×5
6	Еловая	540	30×25×6
7	Серная	230	20×10×4,2
8	Сахарная	200	30×20×4,5
9	Антрацитовая	670	40×25×5,5
10	Торфяная	600	50×30×4,5
11	Печная (сажа)	220	30×25×4,5
12	Мучная	350	20×20×4,5
13	Сосновая	550	30×15×4,5
14	Еловая	500	25×20×5,5
15	Сахарная	400	30×20×5

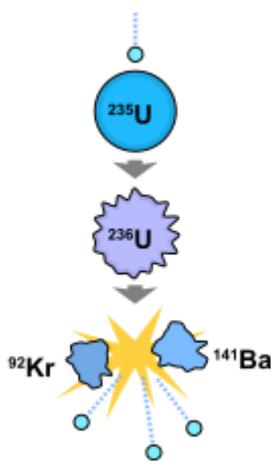
## РАЗДЕЛ 8. ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ

### 8.1 Физические основы высвобождения ядерной энергии

Все известные в настоящее время химические элементы по способности к ядерным превращениям можно разделить на стабильные и радиоактивные.

*Радиоактивность* – способность к самовольному превращению ядер одного химического элемента в ядра другого. Радиоактивными свойствами обладает более 40 естественных элементов и около 1200 радионуклидов, полученных искусственным путем. Практически все они относятся к тяжелым химическим элементам, то есть находятся в конце таблицы Менделеева.

Первоначально была открыта реакция деления тяжелых ядер, сопровождающаяся выделением огромного количества внутриядерной энергии. Дело в том, что энергия связи на один нуклон у тяжелых ядер меньше чем у средних приблизительно на 1 МэВ. Поэтому при делении тяжелого ядра (например, урана) на два ядра элементов из середины таблицы Менделеева (рис. 8.1) высвобождается избыток энергии порядка 200 МэВ.



При делении тяжелых ядер наряду с осколками деления, обладающими огромной кинетической энергией, высвобождается несколько нейтронов, способных вызвать деление соседних ядер материнского радионуклида (рис. 8.1). В свою очередь, нейтроны, образовавшиеся при их делении, могут привести к делению дополнительного количества атомов расщепляющего материала – реакция приобретает цепной характер.

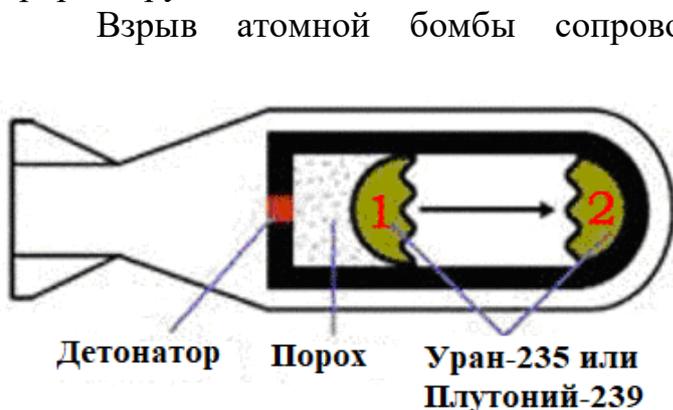
Рисунок 8.1 – Схема радиоактивного деления урана

Обнаружение факта высвобождения нейтронов и реализация цепной реакции позволили получить огромную ядерную энергию и использовать ее для практических целей. Принцип цепной реакции был положен в основу атомной бомбы, для производства которой использовался неосновной изотоп урана  $^{235}\text{U}$  или искусственный изотоп плутония  $^{239}\text{Pu}$ .

Однако цепная реакция может развиваться лишь при определенных условиях, а именно – количество радиоактивного материала должно превышать некоторую минимальную величину. При малом количестве урана или плутония образовавшиеся нейтроны вылетают за пределы вещества, не попадая в другие ядра.

*Критическая масса* – минимальная масса радиоактивного вещества, при которой способна развиваться цепная реакция. Для  $^{235}\text{U}$  критическая масса составляет около 9 кг, при ее превышении процесс размножения протонов идет настолько быстро, что цепная реакция приобретает характер взрыва.

В атомной бомбе (рис. 8.2) взрыв возникает тогда, когда две части чистого урана  $^{235}\text{U}$  или плутония  $^{239}\text{Pu}$ , массы которых меньше критической, соединяются в один. Для их плотного контакта используется обычная взрывчатка. Металлическая оболочка бомбы предназначена для отражения нейтронов и удержания ядерного заряда от распыления до момента, пока не прореагирует значительная часть вещества.



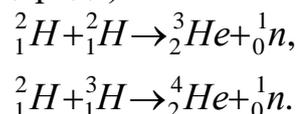
Взрыв атомной бомбы сопровождается выделением огромного количества энергии, в результате чего температура и давление в зоне взрыва повышаются до огромных значений. По выделившейся энергии атомная бомба эквивалентна десяткам тысяч тонн тротила.

Рисунок 8.2 – Схема устройства атомной бомбы

Колоссальная энергия может выделяться не только при делении тяжелых ядер. Существует альтернативный способ высвобождения внутриядерной энергии – реакция термоядерного синтеза легких ядер.

*Термоядерный синтез* – реакция соединения двух легких ядер, протекающая при температуре порядка  $10^7$  К. Энергия связи у легких ядер значительно меньше, чем у средних, поэтому при синтезе более тяжелого ядра происходит выделение значительного количества энергии.

Наиболее вероятными являются реакции синтеза дейтерия и дейтерия-третия (тяжелых изотопов водорода)

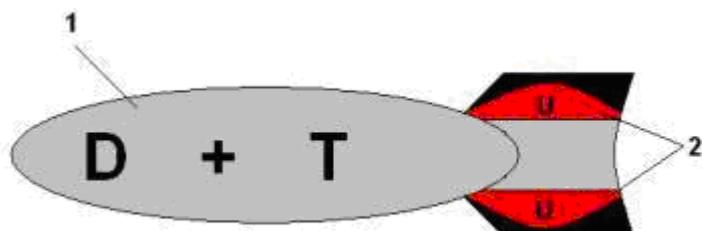


При полной реакции синтеза гелия из 1 кг дейтериево-третиевой смеси выделяется энергия порядка  $10^{15}$  Дж, что почти в 10 раз превышает энергию деления 1 кг урана-235. Величина энерговыделения в процессе синтеза настолько велика, что при большой концентрации взаимодействующих ядер ее может оказаться достаточно для возникновения цепной термоядерной реакции.

Огромное энерговыделение в реакциях синтеза сделало крайне актуальной проблему реализации управляемых термоядерных реакций. Ее решение позволило бы использовать в качестве топлива огромные запасы водорода на земле. Однако при осуществлении управляемого термоядерного синтеза возникает ряд проблем. Наиболее простым является полный синтез одинакового количества дейтерия и трития, однако трития в природе крайне мало, тогда как запасы дейтерия практически неограниченны.

Но главная трудность состоит в том, что для поддержания реакции термоядерного синтеза необходимо создание в ограниченном объеме

температуры порядка  $10^7 - 10^8$  К. Данная проблема была решена при создании водородной бомбы (рис. 8.3), где необходимая для начала синтеза



температура создается за счет подрыва уранового заряда, то есть обычной атомной бомбы. Взрыв такой бомбы эквивалентен миллионам тонн в тротиловом эквиваленте.

Рисунок 8.3 – Схема устройства водородной бомбы: 1 – дейтериево-тритиевая смесь (заряд); 2 – урановый заряд (запал)

## 8.2 Ядерные взрывы, их классификация и поражающие факторы

**Ядерный взрыв** – неуправляемый процесс высвобождения за крайне малый промежуток времени внутриядерной энергии в результате цепной реакции деления тяжелых ядер или реакции термоядерного синтеза легких.

Ядерные взрывы бывают естественного и искусственного происхождения, однако естественные реализуются только в процессе эволюции звезд.

**Искусственный ядерный взрыв** – результат деятельности человека на Земле или в околоземном космическом пространстве, имеющий военную или хозяйственную направленность. Военные ядерные взрывы предназначены для уничтожения крупных объектов и скоплений войск противника, нанесения колоссального материального и экологического ущерба. Мирные ядерные взрывы применяются для перемещения больших масс грунта при строительстве подземных газовых хранилищ, обрушения препятствий в горах, научных исследований в сейсмологии.

В основу классификации ядерных взрывов положена их мощность, в качестве единиц измерения мощности при этом выступают 1 килотонна (кт) или 1 мегатонна (Мт) тротилового эквивалента. Все взрывы делятся на пять групп:

- сверхмалой мощности – менее 1 кт в тротиловом эквиваленте;
- малой мощности – от 1 до 10 кт в тротиловом эквиваленте;
- средней мощности – от 10 до 100 кт в тротиловом эквиваленте;
- большой мощности – от 100 кт до 1 Мт в тротиловом эквиваленте;
- сверхбольшой мощности – более 1 Мт в тротиловом эквиваленте.

Взрыв мощностью 20 кт дает зону полных разрушений радиусом около 1 км, а мощностью 20 Мт – уже 10 км. Взрывом в 100 Мт может быть полностью уничтожен любой город Земли.

По расположению центра ядерные взрывы подразделяют на:

- атмосферные – центр взрыва находится в приземном слое или на высоте не более 10 км;
- экзосферные – центр взрыва находится в тропосфере или космическом пространстве;

- наземные – ядерный заряд размещается непосредственно на поверхности Земли;
- подземные – при размещении заряда на малой глубине происходит выброс грунта и образуется кратер, а при размещении на большой – замкнутая полость в массиве коренных пород;
- надводные – производятся непосредственно над поверхностью Мирового океана;
- подводные – при размещении заряда на малой глубине происходит выброс больших масс воды, а при глубоководном взрыве в толще воды образуется газовый пузырь.

Ядерный взрыв сопровождается действием следующих поражающих факторов:

1. *Ударная волна* (рис. 8.4) – область резкого сжатия воздуха, которая распространяется от места взрыва во все стороны со сверхзвуковой скоростью. При наземном ядерном взрыве около 50 % энергии идёт на образование ударной волны и воронки в земле. Ударная волна разрушает строения и технику, травмирует людей и оказывает отбрасывающее действие быстрым перепадом давления и скоростным напором воздуха.



Последующие за волной разрежение (падение давления воздуха) и обратный ход воздушных масс в сторону развивающегося ядерного гриба также способны нанести определенный ущерб.

Рисунок 8.4 – Распространение ударной волны

2. *Световое излучение* – поток лучистой энергии, включающий ультрафиолетовую, видимую и инфракрасную области спектра (рис. 8.5). Источником светового излучения является светящаяся область взрыва – нагретые до высоких температур и испарившиеся части боеприпаса, окружающего грунта и воздуха. При воздушном взрыве светящаяся область представляет собой шар, при наземном – полусферу.

Максимальная температура поверхности светящейся области составляет обычно 5700-7700°C, когда температура снижается до 1700°C, свечение прекращается. Световой импульс продолжается от долей секунды до нескольких десятков секунд, в зависимости от мощности и условий взрыва. Приблизительно, продолжительность свечения в секундах равна корню третьей степени из мощности взрыва в килотоннах. При этом интенсивность излучения может превышать 1000 Вт/см<sup>2</sup> (для сравнения — максимальная интенсивность солнечного света 0,14 Вт/см<sup>2</sup>). Результатом действия светового излучения может быть воспламенение и возгорание предметов, оплавление, обугливание, большие температурные напряжения в материалах.

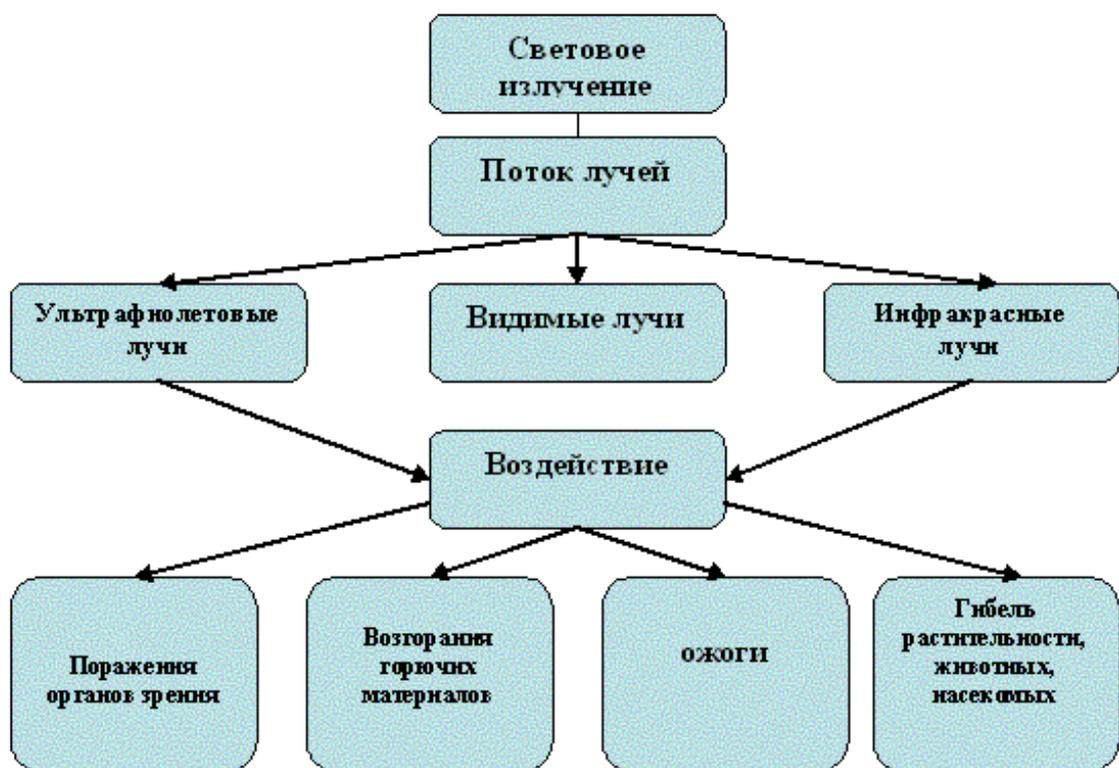


Рисунок 8.5 – Характеристика действия светового излучения

При воздействии светового излучения на человека возникает поражение глаз и ожоги открытых участков тела, а также может возникнуть поражение и защищенных одеждой участков тела. Защитой от воздействия светового излучения может служить произвольная непрозрачная преграда. В случае наличия тумана, дымки, сильной запыленности и/или задымленности воздействие светового излучения также снижается.

3. *Проникающая радиация* – поток гамма-квантов и нейтронов большой интенсивности, распространяющийся в воздухе на 2,5 – 3 км. Время действия составляет несколько секунд, характер зависит от типа и мощности заряда, а также расстояния до центра взрыва. При взрыве заряда в 1 Мт смертельные дозы радиации имеют место в радиусе 2,5 км от эпицентра.

Проникающая радиация может вызывать обратимые и необратимые изменения в материалах, электронных, оптических и других приборах за счет нарушения кристаллической решетки вещества и других физико-химических процессов под воздействием ионизирующих излучений. Защитой от проникающей радиации служат различные материалы, ослабляющие гамма-излучение и поток нейтронов.

От гамма-излучения хорошо защищают материалы, имеющие элементы с высокой атомной массой (железо, свинец, низкообогащенный уран), но эти элементы очень плохо ведут себя под нейтронным излучением: нейтроны относительно хорошо их проходят и при этом генерируют вторичные захватные гамма-лучи, а также активируют радиоизотопы, надолго делая саму защиту радиоактивной (например, железную броню танка; свинец же не проявляет вторичной радиоактивности).

4. *Радиоактивное заражение* – результат выпадения из поднятого в воздух облака значительного количества радиоактивных веществ. Три основных источника радиоактивных веществ в зоне взрыва – продукты деления ядерного горючего, не вступившая в реакцию часть ядерного заряда и радиоактивные изотопы, образовавшиеся в грунте и других материалах под воздействием нейтронов (наведенная радиоактивность).

Оседая на поверхность земли по направлению движения облака, продукты взрыва создают радиоактивный участок, называемый радиоактивным следом. Плотность заражения в районе взрыва и по следу движения радиоактивного облака убывает по мере удаления от центра взрыва. Форма следа может быть самой разнообразной, в зависимости от окружающих условий (рис. 8.6).

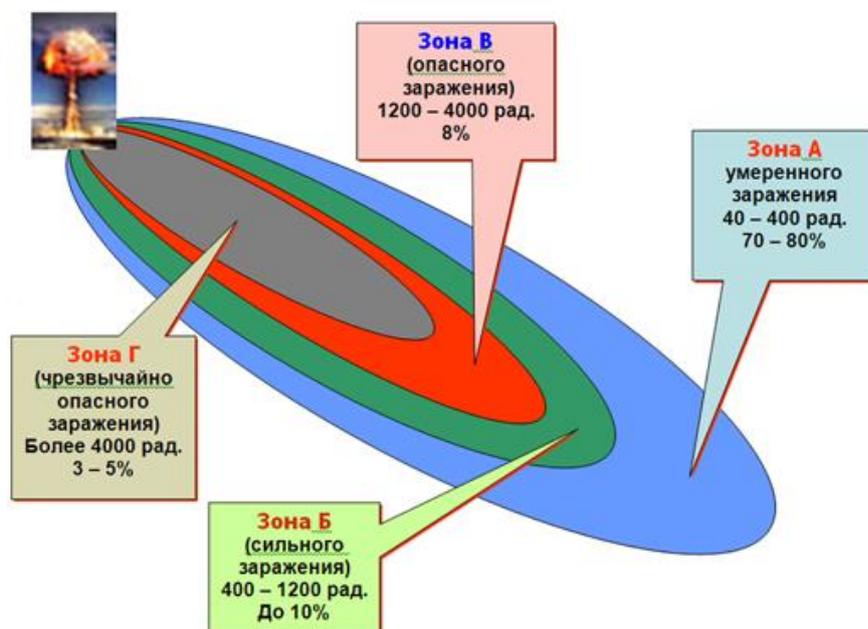


Рисунок 8.6 – Зоны радиоактивного заражения

5. *Электромагнитный импульс* – сильнейшее переменное электромагнитное поле, которое не оказывает никакого влияния на человека, но повреждает электронную аппаратуру, электроприборы и линии электропередач. Помимо этого большое количество ионов, возникшее после взрыва, препятствует распространению радиоволн и работе радиолокационных станций. Этот эффект может быть использован для ослепления системы предупреждения о ракетном нападении. Сила ЭМИ меняется в зависимости от высоты взрыва: в диапазоне ниже 4 км он относительно слаб, сильнее при взрыве 4-30 км, и особенно силен при высоте подрыва более 30 км.

Возникновение ЭМИ происходит следующим образом:

- проникающая радиация, исходящая из центра взрыва, проходит через протяженные проводящие предметы;
- гамма-кванты рассеиваются на свободных электронах, что приводит к появлению быстро изменяющегося токового импульса в проводниках;

- вызванное токовым импульсом поле излучается в окружающее пространство и распространяется со скоростью света, со временем искажаясь и затухая.

Под воздействием ЭМИ во всех неэкранированных протяжённых проводниках индуцируется напряжение, и чем длиннее проводник, тем выше напряжение. Это приводит к пробоям изоляции и выходу из строя электроприборов, связанных с кабельными сетями (трансформаторных подстанций и т.д.). При взрыве в приземном слое атмосферы не имеет существенного значения, его радиус действия перекрывается другими поражающими факторами.

### Вопросы для самоконтроля

1. Какие процессы объединяют под понятием ядерного взрыва?
2. В чем преимущество использования для получения энергии термоядерного синтеза по сравнению с делением трансураниевых элементов?
3. Опишите последствия действия на людей и сооружения ударной волны.
4. Какие поражающие факторы возникают при ядерном взрыве?
5. Чем определяется степень разрушения зданий и сооружений при ядерном взрыве?

### ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 8 «ОЦЕНКА ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА»

Порядок решения задачи:

1. Определить тротиловый эквивалент взрыва по ударной волне  $q_{y.в.}$ , учитывая, что на ее образование идет около 50% мощности ядерного взрыва.

2. Вычислить избыточное давление во фронте ударной волны  $\Delta P_\phi$ , кПа

$$\Delta P_\phi = 105 \cdot \frac{\sqrt[3]{q_{y.в.}}}{R} + 410 \cdot \frac{\sqrt[3]{q_{y.в.}^2}}{R^2} + 1370 \cdot \frac{q_{y.в.}}{R^3},$$

где  $R$  – расстояние до центра ядерного взрыва, м;  $q_{y.в.}$  – тротиловый эквивалент ядерного взрыва по ударной волне, кг.

3. По табл. 6.1 для данного значения  $\Delta P_\phi$  найти значение коэффициента пропорциональности  $K$ , после чего рассчитать по формуле (6.6) радиус зоны разрушения.

4. Определить давление скоростного напора воздуха по формуле

$$P_{ск} = \frac{2,5\Delta P_\phi^2}{\Delta P_\phi + 7P_0}.$$

5. Найти скорость движения фронта ударной волны по формуле (6.3).

6. Определить длительность фазы сжатия при прохождении ударной волны в рассматриваемой точке пространства по формуле

$$\tau = 10^{-3} \cdot \sqrt[6]{\frac{q_{y.в.}}{R^3}}.$$

### Задача 1

Объект находится на расстоянии  $R = 2$  км от центра предполагаемого наземного ядерного взрыва мощностью  $M_{ТНТ} = 200$  кт в тротиловом эквиваленте. Определить избыточное давление во фронте ударной волны и давление, вызванное торможением потока воздуха, вычислить радиус зоны разрушения и оценить характер разрушений данного объекта, определить скорость движения фронта волны и продолжительность фазы сжатия.

### Решение

Определяем тротильный эквивалент взрыва по ударной волне, учитывающий снижение избыточного давления вследствие работы на образование воронки

$$q_{y.в.} = 0,5 \cdot M_{ТНТ} = 0,5 \cdot 200 \cdot 10^3 = 10^5 \text{ кг.}$$

При наземном ядерном взрыве ударная волна перемещается вдоль поверхности земли, а избыточное давление в ее фронте определяется по формуле

$$\begin{aligned} \Delta P_{\phi} &= 105 \cdot \frac{\sqrt[3]{q_{y.в.}}}{R} + 410 \cdot \frac{\sqrt[3]{q_{y.в.}^2}}{R^2} + 1370 \cdot \frac{q_{y.в.}}{R^3} = \\ &= 105 \cdot \frac{\sqrt[3]{10^5}}{2000} + 410 \cdot \frac{\sqrt[3]{(10^5)^2}}{2000^2} + 1370 \cdot \frac{10^5}{2000^3} = 2,43 + 0,22 + 0,02 = 2,67 \text{ кПа.} \end{aligned}$$

Избыточные давления во фронте ударной волны менее 10 кПа считаются безопасными для людей, расположенных вне укрытий.

С учетом полученного значения  $\Delta P_{\phi}$  по табл. 6.1 определяем значение коэффициента пропорциональности

$$K = 28.$$

Тогда радиус зоны разрушений

$$R_{раз} = K \cdot \frac{\sqrt[3]{q_{y.в.}}}{\sqrt[6]{1 + \left(\frac{3180}{q_{y.в.}}\right)^2}} = 28 \cdot \frac{\sqrt[3]{10^5}}{\sqrt[6]{1 + \left(\frac{3180}{10^5}\right)^2}} = 1299 \text{ м.} \quad (6.6)$$

Радиус зоны разрушения меньше расстояния до центра взрыва

$$R_{раз} \leq R = 2000 \text{ м,}$$

поэтому данный объект не будет разрушен.

Степень разрушения конструкций определяется не только давлением во фронте волны, но и торможением следующих за ним масс воздуха. Динамическая нагрузка, создаваемая потоком воздуха, называется давлением скоростного напора и определяется по формуле

$$P_{ск} = \frac{2,5 \Delta P_{\phi}^2}{\Delta P_{\phi} + 7P_0} = \frac{2,5 \cdot 2,67^2}{2,67 + 7 \cdot 101,3} = 0,03 \text{ кПа.}$$

Давление скоростного напора на два порядка меньше давления во фронте ударной волны, а потому не способно привести к разрушению рассматриваемого объекта.

Скорость движения фронта ударной волны

$$v_g = 340 \cdot \sqrt{1 + 0,83\Delta P_{max}} = 340 \cdot \sqrt{1 + 0,83 \cdot 2,67} = 610 \text{ м/с.}$$

Длительность фазы сжатия при прохождении ударной волны в зоне расположения объекта

$$\tau = 10^{-3} \cdot \sqrt[6]{\frac{q_{y.g.}}{R^3}} = 10^{-3} \cdot \sqrt[6]{\frac{10^5}{2000^3}} = 0,13 \text{ мс.}$$

Задача решена.

### Задание к самостоятельной работе № 8

Производственное помещение находится на расстоянии  $R$  от центра предполагаемого наземного ядерного взрыва мощностью  $M_{ТНТ}$  в тротиловом эквиваленте. Определить избыточное давление во фронте ударной волны и давление, вызванное торможением потока воздуха, вычислить радиус зоны разрушения и оценить характер разрушений данного объекта, определить скорость движения фронта волны и продолжительность фазы сжатия. Данные для расчета взять из табл. 8.1.

Таблица 8.1 – Исходные данные к самостоятельной работе № 8

Вариант	Расстояние до центра взрыва $R$ , м	Тротильовый эквивалент ядерного взрыва $M_{ТНТ}$ , кг
1	1 000	400
2	1 200	350
3	1 400	300
4	1 500	250
5	1 650	200
6	1 800	150
7	2 000	100
8	1 750	200
9	1 500	300
10	1 250	400
11	1 000	500
12	900	450
13	800	400
14	750	350
15	700	300

## ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА»

1. Определение горения и процессы, сопутствующие горению веществ и материалов.
2. Условия, необходимые для возникновения горения веществ и материалов.
3. Классификация горючих смесей, символический треугольник.
4. Классификация видов горения по агрегатному состоянию и степени сгорания горючего вещества.
5. Классификация видов горения по степени сгорания горючего вещества и скорости распространения пламени.
6. Классификация видов горения по агрегатному состоянию и скорости распространения пламени.
7. Понятие стехиометрического состава смеси, общие характеристики стехиометрических смесей.
8. Классификация горючих веществ по химическому составу.
9. Правила превращения горючего вещества в продукты горения.
10. Уравнение материального баланса реакции горения.
11. Количество воздуха, теоретически необходимое для полного сгорания единицы объема индивидуального вещества.
12. Количество воздуха, теоретически необходимое для полного сгорания единицы массы вещества сложного состава.
13. Количество воздуха, теоретически необходимое для полного сгорания единицы объема смеси газов.
14. Избыток воздуха и коэффициент избытка воздуха.
15. Продукты, образующиеся при горении индивидуальных веществ и смесей газов.
16. Определение объема продуктов горения индивидуального вещества.
17. Определение объема продуктов горения веществ сложного состава.
18. Основные характеристики пожаро- и взрывоопасности материалов.
19. Определение объема продуктов горения смеси газов.
20. Самовоспламенение и условия, необходимые для его возникновения.
21. Легковоспламеняющиеся жидкости, их классификация.
22. Самовозгорание, его виды.
23. Горение индивидуальных веществ, концентрационные пределы самовоспламенения.
24. Процесс горение смеси газов и его характеристики.
25. Горение жидкостей, его стадии и характеристики.
26. Твердые горючие вещества, их классификация и особенности протекания процесса горения.
27. Тепловые эффекты реакций горения.

28. Теплота сгорания, ее виды.
29. Горючие пыли, характеристики их пожароопасности.
30. Горение древесины, его стадии и образующиеся продукты сгорания.
31. Классификация взрывных явлений по природе происхождения.
32. Общие сведения о взрыве, различия и сходства реакций взрыва и горения.
33. Взрывчатые вещества, их классификация по составу.
34. Классификация взрывных явлений по виду источника энергии.
35. Основные характеристики взрывчатых веществ.
36. Условия, необходимые для возникновения и протекания взрывной реакции.
37. Взрывчатые вещества, их классификация по агрегатному состоянию.
38. Механизмы протекания взрывных реакций при различных видах взрыва (тепловом, ударном, физическом и т.д.).
39. Классификация взрывных явлений по скорости протекания взрывной реакции.
40. Взрывчатые вещества, их классификация по виду взрывчатого превращения.
41. Понятие ударной волны, ее структура.
42. Понятие о тротиловом эквиваленте взрывчатого вещества, избыточное давление и удельная энергия взрыва.
43. Особенности отражения ударных волн от преград.
44. Ударная волна, ее фазы и параметры, характеризующие действие на людей и сооружения.
45. Основные особенности распространения ударных волн.
46. Скорость движения фронта ударной волны, число Маха.
47. Виды разрушений зданий ударными волнами.
48. Виды действия взрыва и вызванные ими зоны разрушения.
49. Пыль и пылевидные материалы, их происхождение и свойства.
50. Классификация пыли по исходному материалу и происхождению.
51. Понятие дисперсности пыли и пылевидных материалов, основные дисперсионные характеристики.
52. Классификация пылевидных материалов по дисперсионным характеристикам.
53. Характеристики пожаро- и взрывоопасности пылевоздушных смесей.
54. Расчетные параметры взрыва пылевоздушных смесей.
55. Концентрационные пределы взрываемости, стадии взрыва пылевоздушной смеси.
56. Физические основы высвобождения ядерной энергии.
57. Ядерные взрывы, их классификация по происхождению, расположению центра и мощности.
58. Поражающие факторы ядерного взрыва.
59. Деление трансурановых элементов, его использование в атомной бомбе.
60. Термоядерный синтез и его использование в водородной бомбе.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаров В.Н. Анализ дисперсного состава пыли в техносфере : учебное пособие / В.Н. Азаров В.Н., Е.Ю. Есина, Н.В. Азарова. – Волгоград : ВолгГАСУ, 2008. – 46 с.
2. Азаров В.Н. Об оценке концентрации мелкодисперсной пыли ( $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$ ) в воздушной среде / В.Н. Азаров, И.В. Тертишников, Е.А. Калюжина, Н.А. Маринин // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архит, 2011. – № 25 (44). – С. 402-406.
3. Андросов А.С. Примеры и задачи по курсу: Теория горения и взрыва. Учебное пособие / А.С. Андросов, Е.П. Салеев – М.: Изд-во ГПС МЧС России, 2005. – 86 с.
4. Андросов А.С. Теория горения и взрыва: Учебное пособие / А.С. Андросов, И.Р. Бегишев, Е.П. Салеев – М.: Академия ГПС МЧС России, 2007. – 240 с.
5. Бегишев И.Р. Курсовая работа по дисциплине «Теория горения и взрыва» (методические указания по выполнению курсовой работы для слушателей ИЗИДО): Учебно-методическое пособие. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2010. – 60 с.
6. Голотин Г.И. Теория горения и взрыва: учебное пособие к практическим занятиям / Г.И. Голотин, И.В. Зубанова; под ред. А.И. Сидорова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. – Ч. I. – 82 с.
7. Демидов П.Г. Горение и свойства горючих веществ / П. Г. Демидов, В.А. Шандыба, П.П. Щеглов; – 2-е изд., пере-раб. – М.: Химия, 1981. – 272 с.
8. Зеленкин В.Г. Теория горения и взрыва: конспект лекций / В.Г. Зеленкин, С.И. Боровик, М.Ю. Бабкин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 166 с.
9. Корольченко А.Я. Процессы горения и взрыва – М.: Пожнаука, 2007. – 205 с.
10. Корсаков Г.А. Расчет зон чрезвычайных ситуаций: учеб. пособие. - С-Пб : Изд-во СПбГУ, 1997. – 112 с.
11. Липкович И.Э. Теория горения и взрыва: Учебное пособие для практических занятий / И.Э. Липкович, Н.В. Петренко, И.В. Орищенко – зерноград: ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2014. – 120 с.
12. Орленко Л.П. Физика взрыва и удара: учебное пособие для вузов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 304 с.
13. Портола В.А. Расчет процессов горения и взрыва: учебное пособие / В.А. Портола, Н.Ю. Луговцова, Е.С. Торосян; Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 108 с.
14. Теория горения и взрыва : учебное пособие / А.С. Голик, Ю.И. Иванов, В.А. Зубарева, О.С. Токарев; под ред. А.С. Голика; Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Кемерово, 2011. – 121 с.

15. Теория горения и взрыва: практикум : учебное пособие / Девисилов В.А., Дроздова Т.И., Тимофеева С.С., под общ. редакцией Девисилов В.А. М. : ФОРУМ, 2012 – 352 с.
16. Теория горения и взрыва. Учебное пособие / Кукин П.П., Юшин В.В., Емельянов С.Г. Издательство Юрайт, 2012 – 435 с.
17. Ударно-волновые явления в конденсированных средах / Г.И. Канель, С.В. Разоренов, А.В. Уткин, В.Е. Фортов. – М.: Янус-К, 1996. – 252 с.
18. Умнов А.Е. Предупреждение и локализация взрывов в подземных условиях / А.Е. Умнов, А.С. Голик. – М.: Недра, 1990.
19. Физика взрыва: учебник: в 2 т. / под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – Т 1. – 832 с.
20. Физика взрыва: учебник: в 2 т. / под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – Т 2. – 656 с.
21. Хворенкова А.Ж. Теория горения и взрыва : сб. задач – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2014. – 80 с
22. Щербакова Е.В. Теория горения и взрыва. Материальный и тепловой баланс процессов горения: учебно-методическое пособие для высшего профессионального образования / Е.В. Щербакова, Т.А. Дмитриевская. – Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2011. – 63 с.

Приложение А

Эмпирические константы самовоспламенения горючих материалов

№	Горючий материал	Значения констант			
		$A_p$	$n_p$	$A_b$	$n_b$
1	Мука ржаная	1,815	0,235	0,360	0,130
2	Хлопок	1,986	0,157	2,334	0,061
3	Торф	1,781	0,264	2,396	0,180
4	Сено	2,103	0,109	2,311	0,058
5	Табак	1,986	0,137	2,322	0,111
6	Солома пшеничная	2,169	0,035	2,438	0,067
7	Мука шламовая	1,456	0,322	2,195	0,078
8	Бактериальная масса	2,113	0,080	2,308	0,054
9	Цианол голубой	1,793	0,167	2,181	0,178
10	Дрожжи товарные	1,867	0,184	2,254	0,078
11	Уголь-сырец	1,423	0,348	2,077	0,369
12	Силос	1,884	0,182	2,300	0,113
13	Нитрозин	1,708	0,222	2,254	0,260
14	Строительный войлок	1,729	0,279	2,350	0,140
15	Уголь бурый	1,733	0,209	2,178	0,114

Приложение Б

Константы Антуана и пределы воспламенения горючих веществ

№	Горючее вещество	Константы Антуана			Пределы воспламенения
		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	
1	Гексиловый спирт $C_6H_{14}O$	6,178	1293,8	152,63	52...157°C
2	Фталевый ангидрид $C_8H_4O_3$	7,1243	2879,1	277,50	134...285°C
3	Уксусная кислота $C_2H_4O_2$	7,1031	1906,5	255,97	-17...118°C
4	Этиловый спирт $C_2H_5OH$	7,8116	1918,5	252,13	-31...78°C
5	Метилэтилкетон $C_4H_8O$	7,0245	1292,8	232,34	-48...80°C

## Физико-химические свойства пыли [12]

<b>Название пыли</b>	<b>НКПВ <math>\varphi^{взн}</math>, кг/м<sup>3</sup></b>	<b>Максимальное давление взрыва <math>P_{max}</math>, кПа</b>	<b>Удельная теплота взрыва пыли <math>q_{уд}</math>, кДж/кг</b>
Антрацитовая	0,023	620	$(32...36) \cdot 10^3$
Торфяная	0,08	500	$10,5 \cdot 10^3$
Печная (сажа)	0,04	480	$(15,7...28,4) \cdot 10^3$
Мучная	0,047	710	$16,8 \cdot 10^3$
Сосновая	0,051	620	$15,4 \cdot 10^3$
Еловая	0,038	620	$20,4 \cdot 10^3$
Серная	0,007	540	$111 \cdot 10^3$
Сахарная	0,01	640	$80 \cdot 10^3$

Учебное издание

КАЛАЙДО Александр Витальевич

# Теория горения и взрыва

Учебное пособие  
с вариантами заданий для самостоятельной работы

В авторской редакции

Подп. в печать 21.12.2018 г. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсет. Гарнитура Times New Roman  
Печать ризографическая. Усл. печ. л. 5,35.  
Тираж 100 экз. Зак. № 142.

*Издатель*

ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет  
имени Тараса Шевченко»  
«Книга»  
ул. Оборонная, 2, г. Луганск, 91011. Т/ф: (0642) 58-03-20.  
e-mail: knitaizd@mail.ru