

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ІШКІ ІСТЕР МИНИСТРЛІГІ**

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ УКРАИНЫ
ТӨТЕНШЕ ЖАҒДАЙЛАР КОМИТЕТІ
КӨКШЕТАУ ТЕХНИКАЛЫҚ ИНСТИТУТЫ**

**Е.В. Тарахно, Д.Г. Трегубов, К.В. Жерноклев
Г.Ш. Хасанова, Д.Т. Казьяхметова**

**ТЕОРИЯ РАЗВИТИЯ
И ПРЕКРАЩЕНИЯ ГОРЕНИЯ
ПРАКТИКУМ
ЧАСТЬ I**

**ЖАНУДЫҢ ДАМУЫ МЕН
СӨНДІРУ ТЕОРИЯСЫ
ПРАКТИКУМ
I БӨЛІМ**

Көкшетау 2017

УДК 614.84 +519
ISBN 978-966-303-178-1

Рецензенты:

Сергазина С.М. заведующая кафедрой химии и биотехнологии факультета естественно-научных дисциплин КГУ имени Ш. Уалиханова
кандидат химических наук, доцент

Раимбеков К.Ж. заместитель начальника Кокшетауского технического института КЧС МВД РК
полковник гражданской защиты,
кандидат физико-математических наук

Теория развития и прекращения горения. Практикум. 1 часть / Е.В. Тарахно, Д.Г. Трегубов, К.В. Жерноклев, Г.Ш. Хасанова, Д.Т. Казыхметова — Кокшетау, Изд-во КТИ, 2017. – 372 с.

В издании сжато изложены основные положения курса «Теория развития и прекращения горения» согласно учебной программе для пожарно-технических образовательных учреждений. Предоставлены методические советы, алгоритмы и примеры решения типичных задач. Приведены условия задач для практических и контрольных работ, вопросы для самоконтроля и справочный материал.

В первой части практикума рассмотрена общая характеристика процесса горения, закономерности и параметры материального и теплового балансов процесса горения.

Издание предназначено для подготовки бакалавров и специалистов, которые учатся в области знаний "Гражданская безопасность" по направлениями "Гражданская защита", "Охрана труда", "Пожарная безопасность".

Жанудың дамуы мен сөндіру теориясы. Практикум. 1 бөлім / Е.В. Тарахно, Д.Г. Трегубов, К.В. Жерноклев, Г.Ш. Хасанова, Д.Т. Казыхметова — Көкшетау: КТИ баспасы, 2017. – 372 б.

Басылымда өрт-техникалық білім беру ұйымдарының оқу бағдарламасына сәйкес «Жанудың дамуы мен сөндіру теориясы» пәні бойынша негізгі мағлұматтар қысқаша көрсетілген. Әдістемелік нұсқаулар, алгоритмдер және есептер шығарудың мысалдары келтірілген. Практикалық және бақылау жұмыстарына арналған есептер, өзіндік дайындалуға сұрақтар және анықтамалық мәліметтер келтірілген.

Практикумның бірінші бөлімінде жану үрдісінің жалпы сипаттамасы, материалдық және жылулық теңгерімнің заңдылықтары мен параметрлері қарастырылған.

Басылым «Өрт қауіпсіздігі», «Азаматтық қорғаныс», «Еңбекті қорғау» мамандықтары бойынша бакалаврлар мен мамандарды даярлау үшін арналған.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
РАЗДЕЛ 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ.....	6
ГЛАВА 1. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ.....	10
§ 1. Определение цвета диффузионного пламени по составу горючего вещества	10
§ 2. Составление уравнения реакции горения индивидуального вещества	19
§ 3. Расчет материального баланса процесса горения	32
Задания для самоконтроля	69
ГЛАВА 2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ.....	81
§ 1. Расчет теплоты сгорания индивидуальных веществ и сложных материалов.....	92
§ 2. Расчет температуры горения веществ.....	112
§ 3. Расчет температуры взрыва паро- и газовоздушных смесей	147
Задания для самоконтроля	164
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	174
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	183
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	186
ЛИТЕРАТУРА.....	187

ВВЕДЕНИЕ

Горение – основной процесс, сопровождающий пожары и взрывы. Знание закономерностей возникновения, развития и прекращения процессов горения позволяет специалистам службы гражданской защиты эффективно решать задачи профилактики и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Учебная дисциплина “Теория развития и прекращения горения” посвящена изучению закономерностей процессов возникновения и развития горения, условий перехода горения во взрыв, методик расчетного и экспериментального определения параметров пожаровзрывоопасности веществ и материалов, основных положений теории прекращения горения, физико-химических основ развития пожара и механизма действия разнообразных огнетушащих средств.

Теоретический материал базируется на основе учебных программ химии, физики, термодинамики и теплопередачи. Как дисциплина профессионального направления “Теория развития и прекращения горения” обобщает и использует теоретические исследования в области пожаров-

зрывоопасности, практический опыт органов пожарной охраны гражданской защиты относительно противопожарных мероприятий и тушения пожаров. Как научная дисциплина “Теория развития и прекращения горения” является теоретической основой решения научно-исследовательских задач, проведения инженерных расчетов при обеспечении условий пожарной безопасности на объектах народного хозяйства, прогнозирования динамики развития опасных факторов пожара.

Приведенные в практикуме методики позволяют определить параметры пожарной опасности веществ и материалов, спрогнозировать последствия чрезвычайных ситуаций техногенного характера. Такие результаты необходимы практическим работникам подразделений гражданской защиты для обеспечения безопасности населения и территорий, материальных и культурных ценностей, защиты окружающей среды от негативных последствий чрезвычайных ситуаций.

РАЗДЕЛ 1.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

Горение – сложный физико-химический процесс, основой которого является быстрая окислительно-восстановительная реакция, сопровождающаяся интенсивным выделением энергии в виде тепла и светового излучения [1] – [3]. В отличие от обычных окислительно-восстановительных процессов, горение характеризуется большой скоростью протекания химической реакции.

Процессы горения классифицируют по нескольким признакам.

1. По агрегатному состоянию компонентов горючей смеси в зоне горения.

Гомогенное горение наблюдается при условии, что компоненты горючей смеси находятся в зоне горения в одинаковом агрегатном состоянии (горение газов, пара жидкостей, газообразных продуктов разложения твердых горючих материалов в среде кислорода или воздуха).

Гетерогенное горение наблюдается при условии, что компоненты горючей смеси находятся в зоне горения в разных агрегатных состояниях; горение происходит на по-

верхности конденсированной фазы (горение углеродного остатка, кокса, нелетучих металлов).

2. По способу образования горючей смеси.

Процесс горения проходит в две стадии: диффузия компонентов смеси к зоне горения и сама химическая реакция в зоне горения, т.е., скорость преобразования исходных веществ в конечные продукты зависит от скорости смешивания реагентов путем молекулярной и турбулентной диффузии, а также и от скорости химической реакции. Общая скорость процесса определяется скоростью самой медленной стадии.

Диффузионное горение происходит при условии диффузии компонентов горючей смеси в зону горения, поэтому скорость процесса определяется скоростью диффузии как самой медленной стадии. При гетерогенном горении в зону реакции диффундирует кислород.

Кинетическое горение происходит в случае предварительного образования гомогенной горючей смеси, которая исключает стадию смешивания компонентов смеси непосредственно в зоне реакции, поэтому, общая скорость процесса горения будет определяться только скоростью (кинетикой) химической реакции.

3. По механизму распространения горения.

Дефлаграционное горение распространяется путем послоевого зажигания холодной горючей смеси за счет передачи тепла от зоны горения в подготовительную зону теплопроводностью и частично излучением.

Детонационное горение распространяется путем быстрого адиабатического сжатия горючей смеси ударной волной, образованной продуктами сгорания.

4. По газодинамическому режиму горения.

Ламинарное горение происходит в случае, когда компоненты горючей смеси поступают в зону реакции медленно, по законам молекулярной или слабой конвекционной диффузии. Направление движения отдельных частей потока совпадает.

Турбулентное горение происходит в случае, когда компоненты горючей смеси поступают в зону реакции быстро, с интенсивным завихрением, перемешиванием продуктов горения с исходной смесью. Направление движения отдельных частей потока не совпадает.

Параметром газодинамического режима горения является числовое значение критерия Рейнольдса. Пламя можно считать ламинарным, если $Re < 2300$; если

$2300 < Re < 10\ 000$ – пламя переходное; а если $Re > 10000$
– пламя турбулентное.

Как любой химический процесс, горение подчиняется законам сохранения массы и энергии. Рассмотрим подробнее, как эти законы выполняются для процесса горения.

ГЛАВА 1. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

§ 1. Определение цвета диффузионного пламени по составу горючего вещества

Пламя – это газовый объем, в котором происходят все процессы, связанные с подготовкой горючей смеси к горению, и сам процесс горения.

В структуре пламени условно можно выделить несколько зон: подготовительную, горения и продуктов горения [1].

В подготовительной зоне происходит процесс термического разложения веществ на составные химические элементы (углерод, водород и др.), радикалы и функциональные группы. Если в подготовительной зоне есть кислород воздуха или кислород, который выделяется при разложении горючего вещества, то происходит предварительное окисление углерода, и в зону горения он уже попадает в виде молекулы CO.

В зоне горения происходят быстрые реакции сгорания продуктов предварительного окисления, углерода и водорода до конечных продуктов (CO₂, H₂O).

Спектры излучения двухатомных (CO) и трёхатомных газов (CO₂, H₂O) расположены за пределами световосприятия человека, поэтому их "вкладом" в цвет пламени можно пренебречь. Если в зону горения попадает молекулярный углерод, то он накаляется, и это предопределяет свечение зоны горения. Если молекулярный углерод не успевает окислиться в зоне горения, то он попадает в зону продуктов горения в виде сажи.

В случае кинетического горения в подготовительную зону поступает уже готовая смесь в концентрациях, близких к стехиометрическим; в этой же зоне происходит частичное разложение горючего вещества и предварительное окисление кислородом, который содержится в составе смеси. В зоне горения образуются конечные продукты реакции, которые практически не излучают света, - пламя будет бесцветным или голубым. Если в смеси, которая поступает для горения, не хватает окислителя, то в подготовительной зоне недостаточно кислорода для образования продуктов предварительного окисления, поэтому в зону горения попадают частички углерода, пламя приобретает желтый цвет.

В случае диффузионного горения горючая смесь образуется в зоне горения за счет диффузии горючего вещества из подготовительной зоны, а окислителя - из окружающей среды. Цвет диффузного пламени зависит от химического состава горючего вещества и температуры в зоне горения.

В процессе горения в подготовительной зоне происходит термическое разложение молекулы горючего вещества на составные химические элементы, радикалы и функциональные группы, и только после этого в зоне горения происходит их окисление. Если в составе горючего вещества достаточно кислорода, то углерод, который выделяется при термическом разложении, успевает весь предварительно окислиться в подготовительной зоне до оксида углерода CO, который в зоне горения догорает и образует продукт полного сгорания – углекислый газ CO₂. В этом случае пламя будет бесцветным или слабоголубым. Так, например, горит муравьиная кислота.

Если частички углерода попадают в зону горения, то они, накаляясь, обуславливают желтый цвет пламени. При условии достаточного доступа воздуха, углерод в зоне горения успевает окислиться до оксиду и диоксида углерода, при этом

сажа не выделяется. Пламя будет ярким, но не коптящим.

При сгорании веществ, которые содержат в своем составе много углерода, или в случае недостатка кислорода в окислительной среде, углерод в зоне горения не успевает окислиться и попадает в зону продуктов горения в виде сажи. Пламя в этом случае будет ярким и коптящим.

Характер свечения диффузионного пламени приблизительно можно охарактеризовать по процентному содержанию кислорода и углерода в горючем веществе (соответствующие данные приведены в таблице 1.1).

Таблица 1.1 - Зависимость цвета диффузионного пламени от состава горючего вещества

Характер свечения пламени	Содержание элементов в горючем веществе, %	
	кислород	углерод
бесцветное	больше 50	до 50
яркое, не коптящее	от 25 до 50	от 50 до 75
яркое, коптящее	меньше 25	больше 75

Практическое значение определения цвета пламени

1. По цвету пламени можно определить режим горения горючего вещества известного состава.

Если по расчету цвет диффузионного пламени данно-

го горючего вещества должен быть ярким, а на практике пламени оказывается голубым, можно сделать вывод, что во время горения происходит предварительное смесеобразование горючего вещества с окислителем, т.е. горение проходит в кинетическом режиме. Если пламя желтое, можно считать режим горения диффузионным.

2. По цвету диффузионного пламени можно приблизительно определить состав неизвестного горючего вещества.

Если пламя яркое и коптящее, можно считать, что горит вещество с большим содержанием углерода. Если пламя яркое, не коптящее – горит вещество с малым содержанием углерода или вещество, которое в своем составе содержит небольшое количество кислорода. Если диффузное пламя голубое, можно сделать вывод, что горит вещество с малым содержанием углерода и большим содержанием кислорода.

Если горючее вещество содержит в своем составе некоторые атомы металлов, то цвет пламени приобретает характерную окраску (см. табл. 1.2).

Таблица 1.2 – Окрашивание пламени соединениями некоторых элементов

Химический элемент	Цвет пламени
Al, Mg	белый
K	фиолетовый
Rb, Cs	розово-фиолетовый
In	сине-фиолетовый
Pb, As, Sb, Se	бледно-фиолетовый
Cu (CuCl ₂)	зеленый (голубой)
B	зеленый
Tl, Te	изумрудно-зеленый
Ba, Mo	желтовато-зеленый
Na	желтый
Ca	темно-красный
Sr, Li	малиновый

3. По яркости и цвету свечения раскаленных твердых тел, попавших в пламя или контактирующих с ним, а также по цвету зоны гетерогенного горения можно определить температуру зоны реакции согласно таблице 1.3. На таком принципе работает оптический пирометр.

Таблица 1.3 – Цвет раскаленных твердых тел в зависимости от их температуры

Цвет раскаленного твердого тела	Температура, °С
светло-красный	550
темно-красный	700
светло-вишневый	800
вишнево-красный	900
ярко-вишневый	1000
желто-горячий	1100
ярко-желтый	1200
белый	1300
ярко-белый	1400
слепящий белый	> 1500

Методика определения цвета диффузионного пламени

1. Рассчитать молярную массу горючего вещества $\mu_{ГВ}$.
2. Рассчитать процентное содержание кислорода и углерода в составе горючего вещества:

$$\text{содержание О: } \varphi_{\text{O}} = \frac{n_{\text{O}} \cdot \mu_{\text{O}}}{\mu_{\text{ГВ}}} 100, \% \quad (1.1)$$

$$\text{содержание С: } \varphi_{\text{C}} = \frac{n_{\text{C}} \cdot \mu_{\text{C}}}{\mu_{\text{ГВ}}} 100, \% \quad (1.2)$$

где n_{O} , n_{C} – соответственно количество атомов кислорода и углерода в молекуле;

μ_{O} , μ_{C} – молярная масса кислорода и углерода, кг·кмоль⁻¹;

$\mu_{\text{ГВ}}$ – молярная масса горючего вещества, кг·кмоль⁻¹.

3. Согласно таблице 1.1 определить цвет диффузионного пламени. Если результаты определения по кислороду и углероду расходятся, цвет пламени определить по кислороду.

Пример решения задачи

Определить цвет диффузионного пламени пропионового ангидрида $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_3$.

Решение

1. Рассчитываем молярную массу горючего вещества:

$$\mu_{\text{ГВ}} = n_{\text{C}} \cdot 12 + n_{\text{H}} \cdot 1 + n_{\text{O}} \cdot 16 = 6 \cdot 12 + 10 \cdot 1 + 3 \cdot 16 = 130 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}.$$

2. Рассчитываем процентное содержание кислорода и углерода в составе горючего вещества по формулам (1.1, 1.2):

содержание О: $\varphi_{\text{O}} = \frac{3 \cdot 16 \cdot 100}{130} = 36,9 \%$;

содержание С: $\varphi_{\text{C}} = \frac{6 \cdot 12 \cdot 100}{130} = 55,4 \%$.

3. По таблице 1.1 определяем цвет диффузионного пламени: содержание О – от 25 до 50 %, содержание С – от 50 до 75 %, поэтому диффузионное пламя пропионового ангидрида будет ярким, без копоти.

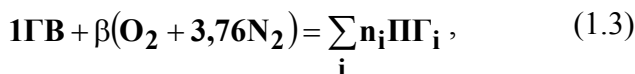
§ 2. Составление уравнения реакции горения индивидуального вещества

Горение – основное явление во время пожара. По своей сущности это физико-химический процесс, в основе которого лежит быстрая реакция окисления, протекающая при контакте горючего вещества и окислителя с образованием продуктов горения и выделением большого количества энергии.

Горение во время пожара происходит в воздушной среде. С горючим веществом взаимодействует только кислород, другие компоненты воздуха в химические реакции не вступают, но принимают участие в тепломассообмене, поэтому при составлении реакции горения учитывают их наличие [5], [6].

Известно, что воздух имеет приблизительно следующий состав: кислорода - 21 %, азота, диоксида углерода и других инертных газов в сумме – 79 %. Поэтому, на один объем кислорода в воздухе приходится $79/21 = 3,76$ объема азота или на один моль кислорода - 3,76 молей азота. Иногда, с учетом влажности воздуха, считают, что на один моль кислорода приходится 3,84 молей азота. Обычно, в уравнении реакции горения состав воздуха обозначают как $(O_2 + 3,76N_2)$.

Считаем, что воздух в зону реакции поступает в количестве, достаточном для полного сгорания одного моля горючего вещества (ГВ). При этом образуются только продукты полного сгорания (ПГ). Тогда уравнение реакции горения приобретает общий вид:



где n_i – количество молей продуктов горения i -го типа, моль;

β – *стехиометрический коэффициент*, который показывает количество молей кислорода, необходимого для полного сгорания одного моля горючего вещества.

Стехиометрический коэффициент можно рассчитать по формуле:

$$\beta = n_C + n_S + \frac{n_H - n_X}{4} - \frac{n_O}{2} + \frac{5n_P}{4}, \quad (1.4)$$

где n_C , n_H , n_O , n_P , n_S , n_X – количество атомов углерода, водорода, кислорода, фосфора, серы, галогена в составе горючего вещества.

При изменении концентрации компонентов смеси изменяется и скорость химической реакции. Максимальное значение скорости реакции получает при эквивалентном соотношении компонентов, когда реакция происходит целиком без избытка или недостатка веществ, которые реагируют. Это соотношение определяется стехиометрическими коэффициентами в уравнении реакции.

Концентрацию горючего вещества, которая соответствует уравнению реакции горения, называют *стехиометрической*. Стехиометрическая концентрация может быть определена в процентах (объемная $\varphi_{\text{СТМ}}$) и в граммах вещества, которое содержится в одном кубическом метре горючей смеси (массовая $\varphi'_{\text{СТМ}}$).

Расчет стехиометрической концентрации проводят исходя из реакции горения. Горючая смесь состоит из одного моля горючего вещества и $\beta(1 + 3,76)$ молей воздуха. При этом, общее количество исходной горючей смеси составляет $(1 + \beta \cdot 4,76)$ молей. Общее количество молей горючей смеси принимаем за 100 % и находим процент горючего вещества в исходной смеси из пропорции:

$$(1 + \beta \cdot 4,76) \text{ моль} - 100 \%$$

$$1 \text{ моль} - \varphi_{\text{СТМ}} \%$$

Общая формула для расчета стехиометрической концентрации в объемных процентах имеет вид:

$$\varphi_{\text{СТМ}} = \frac{100}{1 + \beta \cdot 4,76}, \%. \quad (1.5)$$

Если горения происходит в среде кислорода, то стехиометрическую концентрацию горючего вещества рассчитывают по формуле:

$$\varphi_{\text{СТМ}} = \frac{100}{1 + \beta}, \%. \quad (1.6)$$

При расчете массовой стехиометрической концентрации паров и газов учитывают соотношение между массой и объемом моля вещества. При этом массовую стехиометрическую концентрацию горючих веществ определяют по формуле:

$$\varphi'_{\text{СТМ}} = 10\varphi_{\text{СТМ}} \frac{\mu_{\text{ГР}}}{V_{\mu}}, \text{ Г}\cdot\text{М}^{-3}, \quad (1.7)$$

или непосредственно из уравнения реакции горения в воздухе:

$$\varphi'_{\text{СТМ}} = \frac{1000\mu_{\text{ГР}}}{(1 + 4,76\beta)V_{\mu}}, \text{ Г}\cdot\text{М}^{-3}; \quad (1.8)$$

при условии горения в среде кислорода:

$$\varphi'_{\text{СТМ}} = \frac{1000\mu_{\text{ГР}}}{(1 + \beta)V_{\mu}}, \text{ Г}\cdot\text{М}^{-3}, \quad (1.9)$$

где $\mu_{\text{ГР}}$ – молярная масса горючего вещества, $\text{кг}\cdot\text{кмоль}^{-1}$;

V_{μ} – объем одного киломоля газа при данных условиях, $\text{м}^3\cdot\text{кмоль}^{-1}$, рассчитывают по формуле:

$$V_{\mu} = 22,4 \cdot \frac{101,3 \cdot \text{Т}}{273 \cdot \text{Р}}, \text{ м}^3\cdot\text{кмоль}^{-1}. \quad (1.10)$$

При нормальных условиях ($T = 273 \text{ K}$, $P = 101,3 \text{ кПа}$)

$V_{\mu} = 22,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$; при стандартных условиях ($T = 298 \text{ K}$,

$P = 101,3 \text{ кПа}$) $V_{\mu} = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$.

Практическое значение составления уравнения реакции и определения стехиометрической концентрации

1. Уравнение реакции горения веществ является основой для расчета материального и энергетического баланса процесса горения.

2. Составление уравнения реакции используют при определении важнейших параметров пожарной опасности веществ, а именно: теплоты сгорания, концентрационных пределов распространения пламени, стехиометрической концентрации, температуры горения, температуры и максимального давления при взрыве, температурных пределов распространения пламени.

3. Стехиометрическая концентрация горючего вещества определяет условия его наилучшего сгорания. При этих условиях параметры горения вещества приобретают наиболее опасные значения: температура самовоспламенения – наименьшая, температура горения, давление взрыва

и расход огнетушащих веществ для тушения пожара – наибольшие.

Методика составления уравнения реакции горения

1. Уравнение составляют на 1 моль горючего вещества, поэтому при составлении реакций горения могут применяться и дробные коэффициенты.

2. Окислителем чаще является воздух, состав которого принимают ($O_2 + 3,76N_2$).

3. Горючее вещество и воздух находятся в стехиометрическом соотношении, согласно формуле (1.3).

4. При составлении уравнения реакции горения считают, что образуются только продукты полного сгорания. Качественный состав продуктов горения определяют, учитывая элементный состав горючего вещества, соответственно табл. 1.4.

Таблица 1.4 - Продукты, образующиеся в процессе горения в зависимости от состава горючего вещества

Элемент горючего вещества	Продукт горения
углерод С	диоксид углерода (IV) CO_2
водород Н	вода H_2O
сера S	оксид серы (IV) SO_2
фосфор Р	оксид фосфора (V) P_2O_5
кремний Si	оксид кремния (IV) SiO_2
металл	оксид металла
азот N	молекулярный азот N_2
галогены (F, Cl, Br, J)	галоген водорода (HF, HCl, HBr, HJ)
кислород O	переходит в состав продуктов горения

Галоген водорода образуется при взаимодействии галогенов с атомами водорода горючего вещества. Если атомов галогена больше, чем водорода, выделяется молекулярный галоген.

Имеющийся в горючем веществе кислород также, как и кислород воздуха, вступает в реакции окисления; при этом соответственно уменьшается потребность в воздухе для горения.

5. При составлении уравнения реакции горения коэффициенты в его правой части проставляют в следующей

очередности: сначала уравнивают количество молей углерода, далее серы, фосфора, кремния, галогенов, водорода, последними – кислорода и азота в правой и левой частях уравнения.

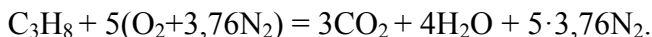
6. Для облегчения расчета стехиометрического коэффициента β можно воспользоваться формулой (1.4).

Пример решения задачи

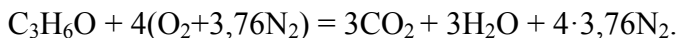
Составить уравнение реакции горения основных классов органических веществ в воздухе.

Решение

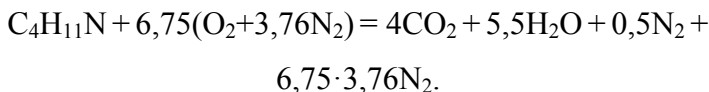
Углеводороды: горение пропана в воздухе:



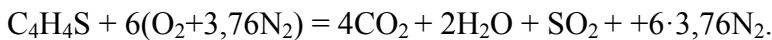
Кислородосодержащие: горение ацетона в воздухе:



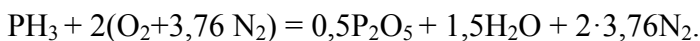
Азотосодержащие: горение диэтиламина в воздухе:



Серосодержащие: горение тиофена в воздухе:



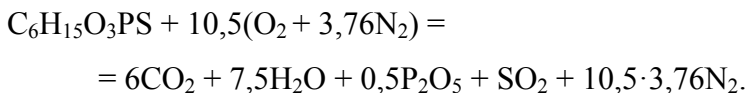
Фосфоросодержащие: горение фосфористого водорода в воздухе:



Галогеносодержащие: горение дихлорэтана в воздухе:



Элементоорганические: горение триэтилтиофосфата:



***Методика расчета стехиометрической концентрации
горючего вещества***

1. Составить уравнение реакции горения, определить значение стехиометрического коэффициента реакции горения β .

2. Рассчитать объемную стехиометрическую концентрацию по формуле (1.5), если реакция протекает у воздушной среде, или по формуле (1.6), если реакция протекает в кислороде.

3. Рассчитать молярную массу горючего вещества и молярный объем газа при данных условиях по формуле (1.10).

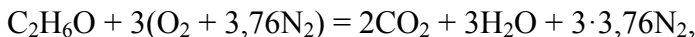
4. Рассчитать массовую стехиометрическую концентрацию по формуле (1.8).

Пример решения задачи

Определить объемную и массовую стехиометрическую концентрацию этилового спирта C_2H_6O в смеси с воздухом при стандартных условиях.

Решение

1. Составляем уравнение реакции горения этилового спирта в воздухе, определяем стехиометрический коэффициент β :



$$\beta = 3.$$

2. Рассчитываем объемную стехиометрическую концентрацию горючего вещества в смеси с воздухом по формуле (1.5):

$$\varphi_{\text{стм}} = \frac{100}{1 + 3 \cdot 4,76} = 6,54 \%$$

3. Рассчитываем молярную массу горючего вещества:

$$\mu_{\text{гв}} = n_{\text{C}} \cdot 12 + n_{\text{H}} \cdot 1 + n_{\text{O}} \cdot 16 = 2 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 1 \cdot 16 = 46 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}.$$

4. Определяем массовую стехиометрическую концентрацию этанола с учетом, что молярный объем газа при стандартных условиях равняется $V_{\mu} = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$:

$$\Phi'_{\text{стм}} = \frac{1000 \cdot 46}{(1 + 3 \cdot 4,76) \cdot 24,4} = 123,3 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}.$$

Вывод: стехиометрическая концентрация этилового спирта в смеси с воздухом при стандартных условиях равняется 6,54 % или $123,3 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$.

§ 3. Расчет материального баланса

процесса горения

Материальный баланс реакции горения отображает закон сохранения массы вещества М.В. Ломоносова, а именно: масса веществ, которая вступила в реакцию, равняется массе веществ, которые образовались во время реакции.

Расчет материального баланса позволяет определить расход воздуха на горение, объем и состав продуктов горения, температуру горения и температуру взрыва, максимальное давление взрыва, температуру пожара, интенсивность газообмена и другие параметры, которые определяют характер развития пожара при разных условиях [2], [3].

При решении многих практических задач важно знать объем воздуха, необходимый для полного сгорания определенной массы или объема горючего вещества, объем продуктов горения и их процентный состав.

Продукты горения – это газообразные, твердые и жидкие вещества, образующиеся при взаимодействии окислителя с горючим веществом в процессе горения.

Состав продуктов горения зависит от состава горю-

чего вещества и условий протекания реакции горения. В продукты горения переходят и нейтральные примеси, которые находились в исходной смеси, и часть горючего вещества или окислителя, которые не принимали участие в реакции. Вместе продукты сгорания образуют систему, которую называют дымом.

Дым – это дисперсная система, которая состоит из твердых и жидких частичек размером $10^{-5} \div 10^{-8}$ г (дисперсной фазы), зависших в газовой дисперсионной среде.

Именно твердые и жидкие продукты горения определяют непрозрачность дыма. Непрозрачный дым образуют и продукты предварительного разложения, которые наиболее токсичны и опасны. По статистике, 70 % погибших во время пожара пострадали из-за отравления токсичными продуктами горения и продуктами термического разложения веществ.

При полном окислении горючего вещества образуются *продукты полного сгорания* (H_2O , CO_2 , SO_2 и т.п.). При недостатке кислорода в составе горючей смеси образуются *продукты неполного сгорания* (C, CO, CH_4O). В состав продуктов неполного сгорания входят продукты термоокислительного разложения (пиролиза), который происходит вслед-

ствие нагревания горючих веществ излучением пламени и горячими продуктами горения. При этом могут образовываться спирты, альдегиды, кетоны, HCl , HCN и др.

Большинство продуктов полного сгорания являются *химически инертными* веществами и в условиях пожара не способны к дальнейшим химическим превращениям. Некоторые продукты полного сгорания являются *реакционноспособными*, т.е. могут вступать в дальнейшие реакции. Например, HCl может вступать в реакцию обмена, а продукты неполного сгорания способны доокисляться при высоких температурах окружающей среды.

В момент образования продукты горения имеют высокую температуру (температуру горения), при этом происходит их температурное расширение. Объем продуктов горения при данных условиях можно определить из универсального газового закона:

$$V_{\text{пг}}^{\text{Тгор}} = \frac{V_{\text{пг}}^{\text{Т}_0} \text{Тгор} \text{Р}_0}{\text{Т}_0 \text{Р}_{\text{пг}}}, \text{ м}^3. \quad (1.11)$$

Опасность дыма обусловлена его высокой температурой, токсичностью, сниженным содержанием кислорода,

непрозрачностью, возможностью образования в закрытых помещениях продуктами термоокислительного разложения и неполного сгорания взрывоопасных смесей с воздухом.

Для снижения опасности дыма используют распыленные струи воды (снижение температуры и осаждение дыма) и удаление дыма с помощью дымососов и дымовых люков.

Для определения теоретических показателей материального баланса составляют уравнение реакции горения вещества (1.3), на основании которого рассчитывают объемы воздуха, необходимый для полного сгорания горючего вещества, и продуктов горения, образующихся при этом.

Различают *удельное* и *полное, теоретическое* и *действительное* количество продуктов процесса горения и воздуха, который расходуется на сгорание горючего вещества.

Удельное количество воздуха необходимо для сгорания единицы количества горючего вещества (1 моль, 1 м³, 1 кг).

Полное количество воздуха необходимо для сгорания данного количества горючего вещества.

Теоретическое количество воздуха – минимальное количество воздуха, необходимое для полного сгорания горючего вещества.

Действительное количество воздуха – это то количество воздуха, которое поступает на сгорание горючего вещества при данных условиях.

По уравнению реакции определяют *удельное теоретическое количество молей воздуха*. Такое количество воздуха в молях, необходимо для полного сгорания 1 моля горючего вещества; его определяют по уравнению реакции:

$$n_{\text{B}}^0 = (1 + 3,76)\beta = 4,76\beta, \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1} \quad (1.12)$$

где β – стехиометрический коэффициент, который показывает количество молей кислорода, необходимого для полного сгорания одного моля горючего вещества.

Удельное теоретическое количество молей продуктов горения равняется сумме молей всех продуктов сгорания в уравнении реакции горения (1.3):

$$n_{\text{пр}}^0 = \sum_i n_{\text{пр}i}, \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (1.13)$$

В действительности, количество молей воздуха, который поступает в зону горения, отличается от теоретического. Такое количество воздуха, который фактически поступает для сгорания 1 моля горючего вещества, называют *удельным действительным количеством молей воздуха* и обозначают $n_{\text{в}}$.

Для характеристики степени обеспеченности воздухом процесса горения используют понятие *коэффициент избытка воздуха* (α), который показывает, во сколько раз количество воздуха, который действительно поступает в зону горения, отличается от теоретически необходимого количества воздуха для полного сгорания горючего вещества:

$$\alpha = \frac{n_{\text{в}}}{n_{\text{в}}^0}, \quad (1.14)$$

где $n_{\text{в}}^0$ – удельное теоретическое количество молей воз-

духа, необходимое для полного сгорания 1 моля горючего вещества;

$n_{\text{в}}$ – удельное действительное количество молей воздуха, который в действительности поступает в зону реакции при сгорании 1 моля горючего вещества.

Соответственно, удельное действительное количество молей воздуха равняется:

$$n_{\text{в}} = n_{\text{в}}^0 \cdot \alpha, \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (1.15)$$

Разность между количеством воздуха, который действительно расходуется на горение, и теоретически необходимым, называют *избытком воздуха*:

$$\Delta n_{\text{в}} = n_{\text{в}} - n_{\text{в}}^0 = n_{\text{в}}^0 (\alpha - 1), \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (1.16)$$

Это та часть воздуха, которая не расходуется во время горения и переходит в продукты горения. Действительное удельное количество молей продуктов горения будет больше теоретического на величину избытка воздуха:

$$n_{\text{пг}} = n_{\text{пг}}^0 + \Delta n_{\text{в}}, \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\text{или } n_{\text{пг}} = n_{\text{пг}}^0 + n_{\text{в}}^0(\alpha - 1), \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (1.17)$$

Наличие избытка воздуха обуславливает присутствие в продуктах горения не прореагировавшего кислорода и азота, который перешел в их состав с избытком воздуха. Содержание каждого компонента в продуктах горения можно определить по формулам:

$$\varphi_{\text{пг}i} = 100 \frac{n_{\text{пг}i}}{n_{\text{пг}}}, \%; \quad (1.18)$$

$$\varphi_{\text{O}_2} = 100 \frac{(\alpha - 1)\beta}{n_{\text{пг}}}, \%; \quad (1.19)$$

$$\varphi_{\text{N}_2} = 100 \frac{\alpha \cdot 3,76\beta}{n_{\text{пг}}}, \%. \quad (1.20)$$

Расчет материального баланса процесса горения осуществляется на основе уравнения реакции горения и состоит в определении количества молей воздуха, необходимого для полного сгорания 1 моля горючего вещества, и

количества молей продуктов горения, которые образуются при этом.

На практике количество вещества измеряют не в молях, а в м^3 , если это газ, или в кг, если вещество находится в конденсированном состоянии (жидкость или твердый материал). Поэтому, при расчетах материального баланса процесса горения необходимо учесть агрегатное состояние горючего вещества. Надо помнить, что 1 кмоль газа при данных температуре T и давлении P занимает объем V_{μ} , м^3 , который можно рассчитать по формуле (1.10).

Если горит 1 кмоль горючего газа, занимающего объем $V_{\mu}^{\text{ГВ}}$, м^3 , на его горение расходуется теоретический объем воздуха, равный $n_{\text{В}}^{\text{О}} V_{\mu}^{\text{В}}$, м^3 . Тогда удельный теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания одного кубического метра горючего газа, можно найти из пропорции:

$$V_{\mu}^{\text{ГВ}} \text{ м}^3 \text{ ГР} \rightarrow n_{\text{В}}^{\text{О}} V_{\mu}^{\text{В}} = 4,76\beta V_{\mu}^{\text{В}} \text{ м}^3 \text{ воздуха,}$$

$$1 \text{ м}^3 \text{ ГР} \rightarrow v_{\text{В}}^{\text{О}} \text{ м}^3 \text{ воздуха.}$$

$$\mathbf{v}_B^0 = \frac{4,76 \cdot \beta \cdot \mathbf{V}_\mu^B}{\mathbf{V}_\mu^{ГВ}}, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}. \quad (1.21)$$

Если горючее вещество находится при тех же условиях, что и воздух, то $\mathbf{v}_\mu^{ГВ} = \mathbf{v}_\mu^B$. Тогда при условии сгорания 1 м³ газа или пара расчет удельных теоретических и действительных объемов совпадает с расчетом соответствующего числа молей:

$$\mathbf{v}_B^0 = 4,76\beta, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}; \quad (1.22)$$

$$\mathbf{v}_B = \alpha \mathbf{v}_B^0, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}. \quad (1.23)$$

Если горючее вещество и продукты горения находятся в одинаковых условиях, так же рассчитывают и их удельные объемы:

$$\mathbf{v}_{ПГ}^0 = \sum_i \mathbf{n}_{ПГi}^0, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}; \quad (1.24)$$

$$\mathbf{v}_{ПГ} = \mathbf{v}_{ПГ}^0 + (\alpha - 1)\mathbf{v}_B^0, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}. \quad (1.25)$$

Полные объемы воздуха и продуктов горения определяют как произведение их удельного объема на объем газа, который сгорел $V_{ГГ}$:

$$V_{\mathbf{B}} = v_{\mathbf{B}} V_{ГГ}, \text{ м}^3; \quad (1.26)$$

$$V_{\text{пг}} = v_{\text{пг}} V_{ГГ}, \text{ м}^3. \quad (1.27)$$

При условии гомогенного горения веществ, находящихся в жидком или твердом агрегатном состоянии, происходит предварительный переход этих веществ в газообразную фазу.

При горении 1 киломоля конденсированного горючего вещества, которое весит μ кг, расходуется теоретический объем воздуха, равный $n_{\mathbf{B}}^0 V_{\mu}^{\mathbf{B}}, \text{ м}^3$. Тогда удельный теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания одного килограмма горючего вещества, определяют из пропорции:

$$\mu \text{ кг ГВ} \rightarrow n_{\mathbf{B}}^0 \cdot V_{\mu}^{\mathbf{B}} = 4,76\beta V_{\mu}^{\mathbf{B}} \text{ м}^3 \text{ воздуха,}$$

$$1 \text{ кг ГВ} \rightarrow v_{\mathbf{B}}^0 \text{ м}^3 \text{ воздуха,}$$

$$\mathbf{v}_B^0 = \mathbf{n}_B^0 \frac{V_B^B}{\mu_{GB}}, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}. \quad (1.28)$$

По аналогии можно рассчитать удельный теоретический объем продуктов горения:

$$\mathbf{v}_{\PiГ}^0 = \frac{V_{\PiГ}^B}{\mu_{GB}} \sum_i \mathbf{n}_{\PiГ}^B, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}, \quad (1.29)$$

а также действительные объемы воздуха и продуктов горения по формулам, аналогичным (1.28) и (1.29):

$$\mathbf{v}_B = \alpha \cdot \mathbf{v}_B^0, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1},$$

$$\mathbf{v}_{\PiГ} = \mathbf{v}_{\PiГ}^0 + (\alpha - 1)\mathbf{v}_B^0, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

Для определения полных объемов воздуха и продуктов горения необходимо удельные объемы умножить на массу сгоревшего вещества:

$$V_B = \mathbf{v}_B \mathbf{m}_{GB}, \text{ м}^3, \quad (1.30)$$

$$V_{\text{шт}} = v_{\text{шт}} m_{\text{ГВ}}, \text{ М}^3, \quad (1.31)$$

где $m_{\text{ГВ}}$ – масса сгоревшего вещества, кг.

Практическое значение расчета материального баланса

Расчет материального баланса позволяет определить расход воздуха на горение, объем и состав продуктов горения, температуру горения и температуру взрыва, максимальное давление взрыва, температуру пожара, интенсивность газообмена и другие параметры, определяющие характер развития пожара при разных условиях.

§ 3.1 Расчет материального баланса процесса горения индивидуального вещества

Методика расчета материального баланса горения индивидуального вещества

1. Составить уравнение реакции горения (1.3), определить стехиометрический коэффициент β (1.4).

2. Рассчитать удельное теоретическое количество молей воздуха по формуле (1.12).

3. Рассчитать удельное теоретическое количество молей продуктов горения по формуле (1.13).

4. При горении с избытком воздуха рассчитать действительное удельное количество молей воздуха и продуктов горения по формулам (1.15), (1.17).

5. Рассчитать состав продуктов горения в процентах по формулам (1.15), (1.17).

6. Рассчитать удельный теоретический объем воздуха и продуктов горения в зависимости от агрегатного состояния горючего вещества.

6.1. Если горючее вещество – газ, провести расчет по формулам (1.22) и (1.24).

6.2. Если горючее вещество находится в твердом или жидком состоянии, провести расчет по формулам (1.28) и (1.29).

7. Рассчитать действительные объемы воздуха и продуктов горения по формулам (1.23) и (1.25).

8. Рассчитать полные объемы воздуха и продуктов горения по формулам (1.26) и (1.27) или (1.30) и (1.31).

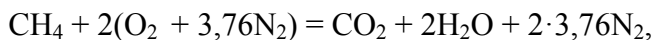
9. Рассчитать объем продуктов горения при температуре горения $V_{\text{пр}}^{\text{T}_{\text{гор}}}$ по формуле (1.11).

Пример решения задачи

Рассчитать объем воздуха, объем и состав продуктов горения при сгорании 10 м^3 метана CH_4 , если горение протекает при нормальных условиях с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,2$. Температура продуктов горения – 2200 К .

Решение

1. Составляем уравнение реакции горения:



$$\beta = 2.$$

2. Определяем удельное теоретическое количество молей воздуха:

$$\mathbf{n_{\mathbf{B}}^0 = 4,76\beta = 4,76 \cdot 2 = 9,52 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Рассчитываем удельное теоретическое количество молей продуктов горения:

$$\begin{aligned}n_{\text{пр}}^0 &= n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + \beta \cdot 3,76_{\text{N}_2} = \\ &= 1 + 2 + 2 \cdot 3,76 = 10,52 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.\end{aligned}$$

4. Рассчитываем действительные объемы воздуха и продуктов горения с учетом избытка воздуха:

$$n_{\text{в}} = 1,2 \cdot 9,52 = 11,42 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$n_{\text{пр}} = 10,52 + (1,2 - 1) \cdot 9,52 = 12,42 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

5. Определяем состав продуктов горения в процентах:

$$\varphi_{\text{CO}_2} = 100 \frac{1}{12,42} = 8,05\%;$$

$$\varphi_{\text{H}_2\text{O}} = 100 \frac{2}{12,42} = 16,1\%;$$

$$\varphi_{\text{O}_2} = \frac{(1,2 - 1) \cdot 2 \cdot 100}{12,42} = 3,21\%;$$

$$\varphi_{\text{N}_2} = \frac{1,2 \cdot 2 \cdot 3,76 \cdot 100}{12,42} = 72,64\%.$$

6. Поскольку горючее вещество – газ, рассчитаем удельные теоретические объемы воздуха и продуктов горения по формулам (1.22) и (1.24):

$$v_{\text{в}}^0 = 9,52 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3};$$
$$v_{\text{пр}}^0 = 10,52 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

7. Рассчитываем удельные действительные объемы воздуха и продуктов горения с учетом коэффициента избытка воздуха по формулам (1.23) и (1.25):

$$v_{\text{в}} = 11,42 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3};$$
$$v_{\text{пр}} = 12,42 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

8. Рассчитываем полные объемы воздуха и продуктов горения:

$$V_{\text{в}} = v_{\text{в}} V_{\text{гр}} = 11,42 \cdot 10 = 114,2 \text{ м}^3;$$
$$V_{\text{пр}} = v_{\text{пр}} V_{\text{гр}} = 12,42 \cdot 10 = 124,2 \text{ м}^3.$$

9. Рассчитываем объем продуктов горения при температуре горения:

$$V_{\text{пг}}^{\text{T}_{\text{гор}}} = \frac{124,2 \cdot 2200 \cdot 101,3}{273 \cdot 101,3} = 1000,9 \text{ м}^3.$$

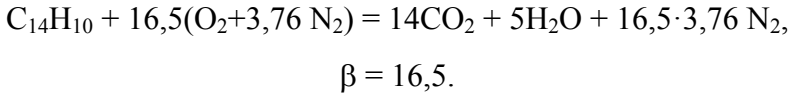
Вывод: для сгорания 10 м^3 метана при нормальных условиях необходимо $114,2 \text{ м}^3$ воздуха, объем продуктов горения при температуре 2200 К составит $1000,9 \text{ м}^3$. Состав продуктов горения: CO_2 – 8,05 %; H_2O – 16,1 %; O_2 – 3,2 %; N_2 – 72,64 %.

Пример решения задачи

Рассчитать объемы воздуха, продуктов горения и процентное содержание CO_2 при сгорании 2 кг нафталина $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$, если горение проходило при температуре окружающей среды $10 \text{ }^\circ\text{C}$, давлении воздуха $100,0 \text{ кПа}$; коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,8$, температура продуктов горения составила $900 \text{ }^\circ\text{C}$.

Решение

1. Составляем уравнение реакции горения:



2. Рассчитываем удельное теоретическое количество молей воздуха по формуле (1.12):

$$n_{\text{в}}^0 = 4,76 \cdot 16,5 = 78,54 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Рассчитываем удельное теоретическое количество молей продуктов горения по формуле (1.13):

$$\begin{aligned} n_{\text{пт}}^0 &= n\text{CO}_2 + n\text{H}_2\text{O} + \beta \cdot 3,76\text{N}_2 = \\ &= 14 + 5 + 16,5 \cdot 3,76 = 81,0 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \end{aligned}$$

4. Рассчитываем действительные объемы воздуха и продуктов горения с учетом избытка воздуха (1.15), (1.17):

$$n_{\text{в}} = \alpha \cdot n_{\text{в}}^0 = 1,8 \cdot 78,54 = 141,4 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$n_{\text{шт}} = 81,04 + (1,8 - 1) \cdot 78,54 = 143,9 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

5. Рассчитываем процентное содержание CO_2 в составе продуктов горения:

$$\varphi_{\text{CO}_2} = 100 \frac{14}{143,9} = 9,7 \text{ \%}.$$

6. Поскольку горючее вещество находится в твердом состоянии, рассчитаем удельные теоретические объемы воздуха и продуктов горения по формулам (1.28) и (1.29). Предварительно определим молярную массу нафталина и молярный объем воздуха при данных условиях (формула (1.10)):

$$\mu_{\text{ГВ}} = 14 \cdot 12 + 10 \cdot 1 = 178 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1},$$

$$V_{\mu} = \frac{101,3 \cdot 22,4 \cdot (273 + 10)}{100,0 \cdot 273} = 23,53 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}.$$

$$v_{\text{В}}^0 = \frac{4,76 \cdot 16,5 \cdot 23,53}{178} = 10,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1};$$

$$v_{\text{пг}}^0 = \frac{(14 + 5 + 16,5 \cdot 3,76) \cdot 23,53}{178} = 10,7 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

7. Рассчитываем удельные действительные объемы воздуха и продуктов горения с учетом коэффициента избытка воздуха по формулам, аналогичными (1.23) и (1.25):

$$v_{\text{в}} = 1,8 \cdot 10,4 = 18,7 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1};$$

$$v_{\text{пг}} = 10,7 + (1,8 - 1) \cdot 10,4 = 19,0 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

8. Рассчитываем полные объемы воздуха $V_{\text{в}}$ и продуктов горения $V_{\text{пг}}$ при данных условиях:

$$V_{\text{в}} = 18,7 \cdot 2 = 37,4 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{пг}} = 19,0 \cdot 2 = 38,0 \text{ м}^3.$$

9. Рассчитываем объем продуктов горения при температуре горения:

$$V_{\text{пг}}^{\text{Тгор}} = \frac{38,0 \cdot (273 + 900)}{(273 + 10)} = 157,6 \text{ м}^3.$$

Вывод: для сгорания двух килограммов нафталина при данных условиях необходимо $37,4 \text{ м}^3$ воздуха, при этом продукты горения занимают объем $157,6 \text{ м}^3$, а содержание CO_2 в продуктах горения равняется $9,7 \%$.

§ 3.2 Расчет материального баланса процесса горения сложных веществ и материалов

§ 3.2.1. Горение смеси газов

При расчете материального баланса процесса горения смеси газов сначала определяют объемы воздуха и продуктов сгорания для каждого горючего компонента этой смеси. Потом, в соответствии объемному содержанию компонентов, определяют объем воздуха и продуктов сгорания смеси газов.

Удельный теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания газовой смеси известного состава, рассчитывают по формуле:

$$v_{\text{B}}^0 = \frac{\sum_i \beta_i \varphi_i - \varphi_{\text{O}_2}}{21}, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}, \quad (1.32)$$

где φ_i – содержание i -го горючего компонента в смеси, %;

β_i – стехиометрический коэффициент в уравнении реакции горения i -го горючего компонента смеси;

φ_{O_2} – содержание кислорода в исходной смеси, %.

Для определения объема и состава продуктов горения, образующихся при сгорании смеси газов, необходимо определить объемы и состав продуктов горения каждого горючего компонента смеси, согласно уравнениям реакции горения. Тогда удельный теоретический объем продуктов горения определяют как сумму удельных объемов продуктов горения газовой смеси по формуле:

$$v_{\text{пг}}^0 = \sum_{i=1}^n v_{\text{пг}i}^0 \cdot r_i, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}, \quad (1.33)$$

где $r_i = \frac{\varphi_i}{100}$ – объемная доля i -го горючего компонента в смеси;

$v_{\text{пр}i}^0$ – удельный теоретический объем i -го продукта

горения, образующегося при сгорании каждого горючего компонента смеси.

Для упрощения расчетов материального баланса сложных смесей горючих газов в таблице 1.5 представлены рассчитанные значения удельных объемов продуктов сгорания отдельных горючих газов, которые численно равняются их стехиометрическим коэффициентам в уравнении реакции горения.

Таблица 1.5 – Удельные объемы продуктов сгорания некоторых газов

Газ		Объем продукта сгорания, $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$			
название	формула	CO ₂	H ₂ O	N ₂	SO ₂
водород	H ₂	–	1,0	1,88	–
оксид углерода (II)	CO	1,0	–	1,88	–
сероводород	H ₂ S	–	1,0	5,64	1,0
метан	CH ₄	1,0	2,0	7,52	–
ацетилен	C ₂ H ₂	2,0	1,0	9,40	–
этан	C ₂ H ₆	2,0	3,0	13,16	–
этилен	C ₂ H ₄	2,0	2,0	11,28	–
пропан	C ₃ H ₈	3,0	4,0	18,80	–
бутан	C ₄ H ₁₀	4,0	5,0	24,40	–
пентан	C ₅ H ₁₂	5,0	6,0	30,08	–

Методика определения объема воздуха и продуктов горения при условии полного сгорания смеси газов

1. Составить уравнение реакции горения каждого из горючих компонентов газовой смеси и определить стехиометрический коэффициент .

2. Рассчитать удельный теоретический объем воздуха для полного сгорания газовой смеси по формуле (1.32).

3. Рассчитать удельный действительный объем воздуха с учетом коэффициента избытка воздуха по формуле (1.23).

4. Рассчитать полный действительный объем воздуха, который расходуется при условии сгорания заданного объема газовой смеси, по формуле (1.26).

5. Для облегчения дальнейших расчетов составить таблицу для определения удельных объемов продуктов горения, исходя из объемных долей компонентов исходной газовой смеси.

6. Рассчитать удельный теоретический объем продуктов горения при условии сгорания смеси газов по формуле (1.33).

7. Рассчитать удельный и полный действительный объем продуктов горения с учетом коэффициента избытка воздуха по формуле (1.25, 1.27).

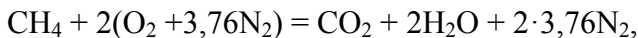
8. Рассчитать объем продуктов горения при данных условиях по формуле (1.11).

Пример решения задачи

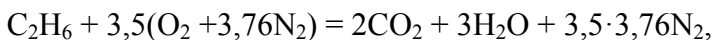
Определить объем воздуха и объем продуктов горения, образующихся при сгорании 10 м^3 попутного газа такого состава: метан CH_4 - 58 %, этан C_2H_6 - 7,2 %, пропан C_3H_8 - 5,8 %, бутан C_4H_{10} - 7,0 %, пентан C_5H_{12} - 8,5 %, оксид углерода (IV) CO_2 - 3 %, азот N_2 - 10,5 %. Горение происходит с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,7$; температура горения равняется $1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Решение

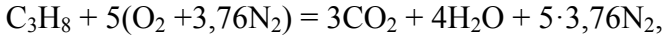
1. Составляем уравнения реакции горения и определяем стехиометрические коэффициенты в уравнениях реакции горения для каждого горючего компонента газовой смеси:



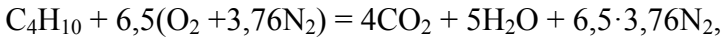
$$\beta_{\text{CH}_4} = 2;$$



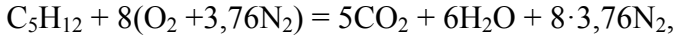
$$\beta_{\text{C}_2\text{H}_6} = 3,5;$$



$$\beta_{\text{C}_3\text{H}_8} = 5;$$



$$\beta_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 6,5;$$



$$\beta_{\text{C}_5\text{H}_{12}} = 8.$$

2. Рассчитываем удельный теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания газовой смеси:

$$v_{\mathbf{B}}^0 = \frac{(2 \cdot 58 + 3,5 \cdot 7,2 + 5 \cdot 5,8 + 6,5 \cdot 7 + 8 \cdot 5,8)}{21} = 12,5 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Рассчитываем удельный действительный объем воздуха с учетом коэффициента избытка воздуха:

$$v_{\mathbf{B}} = 1,7 \cdot 12,5 = 21,25 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

4. Рассчитать полный действительный объем воздуха, расходуемый на сгорание заданного объема газовой смеси:

$$V_{\mathbf{B}} = 21,25 \cdot 10 = 212,5 \text{ м}^3.$$

5. Определяем удельные объемы продуктов горения, исходя из объемных долей компонентов исходной газовой смеси и коэффициентов табл. 1.5. Для удобства составляем таблицу.

Компонент смеси	Объемная доля, Γ_i	Объем продуктов сгорания, $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$		
		CO ₂	H ₂ O	N ₂
метан CH ₄	0,58	0,58·1	0,58·2	0,58·7,52
этан C ₂ H ₆	0,072	0,072·2	0,072·3	0,072·13,16
пропан C ₃ H ₈	0,058	0,058·3	0,058·4	0,058·18,8
бутан C ₄ H ₁₀	0,07	0,07·4	0,07·5	0,07·24,4
пентан C ₅ H ₁₂	0,085	0,085·5	0,085·6	0,085·30,08
оксид углерода (IV) CO ₂	0,03	0,03	–	–
азот N ₂	0,105		–	0,105
Всего	1,0	1,6	2,5	10,8

6. Рассчитываем удельный теоретический объем продуктов горения при сгорании данной смеси газов:

$$v_{\text{пт}}^0 = 1,6 + 2,5 + 10,8 = 14,9 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

7. Рассчитываем удельный и полный действительный объем продуктов горения 10 м^3 попутного газа при нормальных условиях с учетом коэффициента избытка воздуха:

$$v_{\text{пг}} = 14,9 + (1,7 - 1) \cdot 12,5 = 23,65 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3},$$

$$V_{\text{пг}} = 23,65 \cdot 10 = 236,5 \text{ м}^3.$$

8. Рассчитываем объем продуктов горения с учетом расширения при температуре горения:

$$V_{\text{пг}} = \frac{236,5 \cdot 101,3 \cdot (1000 + 273)}{273 \cdot 101,3} = 1102,8 \text{ м}^3.$$

Вывод: при сгорании 10 м^3 попутного газа при данных условиях нужно $212,5 \text{ м}^3$ воздуха; при этом образуется $1102,8 \text{ м}^3$ продуктов горения.

§ 3.2.2. Горение сложных конденсированных**материалов**

Сложный конденсированный материал – это смесь веществ в жидком или твердом состоянии, имеющий химический состав, который нельзя выразить химической формулой. Это такие вещества как дерево, торф, сланцы, нефть, нефтепродукты и т.п. Состав таких веществ выражают массовыми долями или процентным содержанием химических элементов.

Теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания материала заданного элементного состава, можно выразить формулой:

$$v_{\text{в}}^{\text{о}} = \frac{4,76V_{\mu}}{100} \left(\sum_i \frac{\varphi_i \beta_i}{\mu_i} - \frac{\varphi_{\text{O}}}{32} \right), \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}, \quad (1.34)$$

где φ_i , φ_{O} – массовое процентное содержание i -го горючего элемента и кислорода в составе материала, %;

β_i – стехиометрический коэффициент в уравнении реакции горения i -го горючего элемента в составе материала;

μ_i – молярная масса i -го химического элемента в составе материала, $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$;

V_μ – объем киломоля газа при данных условиях, $\text{м}^3 \text{кмоль}^{-1}$, рассчитывают по формуле (1.10).

Если горючее вещество содержит только углерод, водород, кислород и серу, а горючая система находится при стандартных условиях ($V_\mu = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$), формула (1.34) примет вид:

$$\begin{aligned} v_{\text{В}}^{\text{о}} &= \frac{4,76V_\mu}{4 \cdot 100} \left(\frac{\varphi_{\text{C}}}{3} + \varphi_{\text{H}} - \frac{\varphi_{\text{O}} - \varphi_{\text{S}}}{8} \right) = \\ &= 0,29 \left(\frac{\varphi_{\text{C}}}{3} + \varphi_{\text{H}} - \frac{\varphi_{\text{O}} - \varphi_{\text{S}}}{8} \right), \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}. \end{aligned} \quad (1.35)$$

Расчет объема продуктов сгорания сложного горючего конденсированного материала проводят последовательным определением объемов продуктов сгорания каждого из химических элементов, входящих в его состав. Удельный теоретический объем продуктов горения сложного материала определяют как сумму удельных объемов продуктов горения каждого химического элемента по формуле:

$$v_{\text{пг}}^0 = \sum_i v_{\text{пг}i}^0 g_i, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}, \quad (1.36)$$

где $g_i = \frac{\Phi_i}{100}$ – массовая доля i -го химического элемента в составе материала;

$v_{\text{пг}i}$ – удельный теоретический объем продуктов горения, образующихся при сгорании i -го горючего элемента в составе материала, $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$, определяют по уравнению реакции горения каждого горючего элемента по формуле:

$$v_{\text{пг}i}^0 = \frac{V_{\mu}}{\mu_i} \beta_i, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}. \quad (1.37)$$

Для упрощения расчетов материального баланса сложных материалов в таблице 1.6 представлены рассчитанные при нормальных и стандартных условиях значения удельных объемов продуктов сгорания отдельных химических элементов.

Таблица 1.6 - Удельные объемы продуктов горения некоторых элементов при нормальных и стандартных условиях

Элемент горючего материала	Объем продуктов сгорания*, $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$			
	CO_2	H_2O	N_2	SO_2
углерод С	1,87(2,03)*	–	7,0(7,65)*	–
водород Н	–	11,2(12,2)*	21,1(22,9)*	–
сера S	–	–	2,63(2,87)*	0,7(0,76)*
азот N	–	–	0,8(0,87)*	–
кислород O	–		-2,63 (-2,87)*	
влага W	–	1,24(1,36)*		

*) в скобках – объемы продуктов сгорания при стандартных условиях.

Методика определения объема продуктов горения сложных материалов

1. Рассчитать удельный теоретический объем воздуха, необходимого для полного сгорания материала данного элементного состава, по формуле (1.34); если процентное содержание химических элементов в составе материала не задано, то оно может быть рассчитано по условной химической формуле материала согласно (1.2).

2. Рассчитать удельный действительный объем воздуха с учетом коэффициента избытка воздуха по формуле (1.23).

3. Рассчитать полный действительный объем воздуха, который расходуется при условии сгорания заданного количества материала, по формуле (1.30).

4. Для облегчения дальнейших расчетов составить таблицу для определения удельных объемов продуктов горения, исходя из элементного состава горючего материала с использованием коэффициентов таблицы 1.6 (при нормальных или стандартных условиях) или коэффициентов, рассчитанных по формуле (1.36).

5. Рассчитать удельный теоретический объем продуктов горения материала данного элементного состава по формуле (1.36).

6. Рассчитать полный действительный объем продуктов горения с учетом коэффициента избытка воздуха по формуле (1.31).

7. Рассчитать объем продуктов горения при температуре горения по формуле (1.11).

Пример решения задачи

Рассчитать удельные и полные объемы воздуха и продуктов горения, содержание пара воды в продуктах горения при полном сгорании 5 кг торфа такого состава: С –

57,9 мас. %; Н – 5,3 мас. %; О – 29,7 мас. %; S – 1,1 мас. %; влаги W – 6 мас. %. Горение проходило при нормальных условиях с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,5$, температура продуктов горения - 950 °С.

Решение

1. Рассчитываем удельный теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания торфа, по формуле (1.34):

$$v_B^o = \frac{4,76 \cdot 22,4}{4 \cdot 100} \cdot \left(\frac{57,9}{3} + 5,3 - \frac{29,7 - 1,1}{8} \right) = 5,6 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

2. Рассчитываем удельный действительный объем воздуха:

$$v_B = 1,5 \cdot 5,6 = 8,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

3. Определяем полный действительный объем воздуха:

$$V_B = 8,4 \cdot 5 = 42 \text{ м}^3.$$

4. Определяем удельный теоретический объем продуктов горения при нормальных условиях по массовым долям элементов в материале и коэффициентам табл. 1.6. Составим таблицу.

Элементы вещества	Массовая доля	Объем продуктов сгорания, м ³ ·кг ⁻¹			
		CO ₂	H ₂ O	SO ₂	N ₂
углерод С	0,579	0,579·1,87	–	–	0,579·7,0
водород Н	0,053	–	0,053·11,2	–	0,053·21,1
сера S	0,011	–	–	0,011·0,7	0,011·2,63
кислород О	0,297	–	–	–	-0,297·2,63
влага W	0,06	–	0,06·1,24	–	–
Всего	1,0	1,08	0,67	7,7·10 ⁻³	4,42

5. Рассчитываем удельный теоретический объем продуктов горения:

$$v_{\text{пт}}^0 = 1,08 + 0,67 + 7,7 \cdot 10^{-3} + 4,42 = 6,2 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

6. Рассчитываем удельный и полный действительный объемы продуктов горения:

$$v_{\text{пт}} = 6,2 + (1,5 - 1) \cdot 5,6 = 9,0 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1},$$

$$V_{\text{пт}} = 9,0 \cdot 5 = 45 \text{ м}^3.$$

7. Рассчитываем объем продуктов горения при температуре горения:

$$V_{\text{пг}}^{\text{T}_{\text{гор}}} = \frac{45 \cdot 101,3 \cdot (950 + 273)}{273 \cdot 101,3} = 201,6 \text{ м}^3.$$

8. Рассчитываем содержание пара воды в продуктах горения по его удельному объему (см. п.4), по формуле (1.18):

$$\Phi_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,67 \cdot 100}{9} = 7,4\%.$$

Вывод: при сгорании 5 кг торфа расходуется 42,0 м³ воздуха и выделяется 201,6 м³ продуктов горения с температурой 950 °С; содержание воды в продуктах горения – 7,4 %.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Составить уравнения реакции горения в воздухе веществ, приведенных в таблице.

№	Вещество	Формула	№	Вещество	Формула
1.	углерод метан глицерин анилин хлористый этил	C CH ₄ C ₃ H ₈ O ₃ C ₆ H ₇ N C ₂ H ₅ Cl	7.	натрий октан диэтиловый эфир гексамидин сероуглерод	Na C ₈ H ₁₈ C ₄ H ₁₀ O C ₁₂ H ₁₄ O ₂ N ₂ CS ₂
2.	сера этан амилацетат тринитротолуол дифторэтан	S C ₂ H ₆ C ₇ H ₁₄ O ₂ C ₇ H ₅ O ₆ N ₃ C ₂ H ₄ F ₂	8.	кальций гексан пропанол никотин диметилфосфат	Ca C ₆ H ₁₄ C ₃ H ₈ O C ₁₀ H ₁₄ N ₂ C ₂ H ₇ O ₄ P
3.	фосфор ацетилен этилацетат нитробензол бромметан	P C ₂ H ₂ C ₄ H ₈ O ₂ C ₆ H ₅ O ₂ N CH ₃ Br	9.	магний пропилен этиловый спирт уротропин диэтилтиоэфир	Mg C ₃ H ₆ C ₂ H ₆ O C ₆ H ₁₂ N ₄ C ₄ H ₁₀ S
4.	оксид углерода (II) бензол уксусная кислота тринитроглицерин хлорбензол	CO C ₆ H ₆ C ₂ H ₄ O ₂ C ₃ H ₅ O ₆ N ₃ C ₆ H ₅ Cl	10.	алюминий стирол метилловый спирт нитроанилин хлорбутан	Al C ₈ H ₈ CH ₄ O C ₆ H ₆ O ₂ N ₂ C ₄ H ₉ Cl

Глава 1. Материальный баланс процесса горения

5.	калий толуол уксусный альдегид диметиламин фосген	K C ₇ H ₈ C ₂ H ₄ O C ₂ H ₇ N COCl ₂	11.	литий додекан этиленгликоль нитрометан хлорбензол	Li C ₁₂ H ₂₆ C ₂ H ₆ O ₂ CH ₃ O ₂ N C ₆ H ₅ Cl
6.	водород ксилол ацетон аммиак дихлорметан	H ₂ C ₈ H ₁₀ C ₃ H ₆ O NH ₃ CH ₂ Cl ₂	12.	цезий циклопентан метановая кислота нитротолуол хлоргексен	Cs C ₅ H ₁₀ CH ₂ O ₂ C ₇ H ₇ O ₂ N C ₆ H ₁₁ Cl

2. Определить характер свечения диффузионного пламени веществ, приведенных в таблице.

№	Вещество	Формула	№	Вещество	Формула
1.	этилацетат	C ₄ H ₈ O ₂	11	стирол	C ₈ H ₈
2.	амилацетат	C ₇ H ₁₄ O ₂	12	глицерин	C ₃ H ₈ O ₃
3.	метанол	CH ₄ O	13	гексан	C ₆ H ₁₄
4.	пропанол	C ₃ H ₈ O	14	пентан	C ₅ H ₁₂
5.	гептиловый спирт	C ₇ H ₁₆ O	15	декан	C ₁₀ H ₂₂
6.	уксусная кислота	C ₂ H ₄ O ₂	16	этилбензол	C ₈ H ₁₀
7.	муравьиная кислота	CH ₂ O ₂	17	этиленгликоль	C ₂ H ₆ O ₂
8.	метилацетат	C ₃ H ₆ O ₂	18	толуол	C ₇ H ₈
9.	циклогексан	C ₆ H ₁₂	19	диоксан	C ₄ H ₈ O ₂
10	гептан	C ₇ H ₁₆	20	гексан	C ₆ H ₁₄

3. Рассчитать объемную и массовую стехиометрическую концентрацию вещества:

- а) в воздухе и кислороде при нормальных условиях;
 б) в воздухе при указанных в таблице условиях.

№	Вещество	Формула	$t_o, ^\circ\text{C}$	$P_o, \text{кПа}$
1.	пропиловый спирт	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	5	102,5
2.	метиловый спирт	CH_4O	0	98,0
3.	амиловый спирт	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$	18	100,0
4.	оксид углероду (II)	CO	25	98,0
5.	бутан	C_4H_{10}	5	100,0
6.	пентан	C_5H_{12}	18	101,5
7.	гексиловый спирт	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	10	100,5
8.	сероуглерод	CS_2	25	102,5
9.	ацетон	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	10	102,5
10.	бензол	C_6H_6	20	101,5
11.	этилацетат	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	15	98,5
12.	этиленгликоль	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$	17	100,5
13.	этиловый спирт	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	23	101,0
14.	бутилацетат	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2$	30	99,5
15.	анилин	$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	10	101,0

4*. Сколько карбида кальция CaC_2 должно прореагировать с водой, чтобы в помещении объемом 480 м^3 образовалась стехиометрическая концентрация ацетилена C_2H_2 в смеси с воздухом при нормальных условиях.

5. Для веществ, представленных в таблице, рассчитать полные объемы воздуха, продуктов сгорания (ПГ) и процентный состав продуктов горения при сгорании заданного количества горючего газа или пара при данных условиях.

№	Вещество		$V_{\text{ГВ}},$ м^3	α	$t_{\text{нач}},$ °C	$t_{\text{пр}},$ °C
	название	формула				
1.	оксид углероду (II)	CO	2	1,8	20	1100
2.	метан	CH ₄	14	1,5	0	900
3.	этан	C ₂ H ₆	4	1,4	5	950
4.	этилен	C ₂ H ₄	7	1,3	18	1200
5.	ацетилен	C ₂ H ₂	80	1,7	10	900
6.	пропан	C ₃ H ₈	9	1,1	25	1200
7.	пропилен	C ₃ H ₆	200	1,6	10	1000
8.	бутан	C ₄ H ₁₀	11	1,2	18	900
9.	бутаналь	C ₄ H ₈ O	3	1,9	32	1100
10.	пентан	C ₅ H ₁₂	25	2,2	20	1100
11.	пентанол	C ₅ H ₁₂ O	3	1,4	15	1200
12.	гексан	C ₆ H ₁₄	12	1,6	40	1200
13.	гексанол	C ₆ H ₁₄ O	1	1,4	22	800
14.	гептан	C ₇ H ₁₆	7	1,5	50	950
15.	октан	C ₈ H ₁₈	4	1,7	13	900
16.	диметиловый эфир	C ₂ H ₆ O	5	1,9	25	800
17.	сероводород	H ₂ S	7	1,4	30	950
18.	аммиак	NH ₃	5	1,6	27	1000
19.	уксусная кислота	C ₂ H ₄ O ₂	2	2,0	7	1050
20.	октановая кислота	C ₈ H ₁₆ O ₂	5	1,7	65	1000

6. Для жидкостей, представленных в таблице, рассчитать объем воздуха, необходимый для сгорания заданной массы горючего вещества, объем и состав продуктов горения, если горение происходит при указанных в таблице условиях.

№	Вещество	Формула	m, кг	α	$t_{\text{нач}},$ °C	$P_0,$ кПа	$t_{\text{пр}},$ °C
1.	пентанол	$C_5H_{12}O$	7	1,1	25	100	900
2.	гексанол	$C_6H_{14}O$	3	2,1	5	105	1000
3.	фенол	C_6H_6O	6	1,5	5	103	800
4.	хлорбензол	C_6H_5Cl	3	1,1	25	97	1100
5.	анилин	C_6H_7N	2	1,3	25	103	1200
6.	нитротолуол	$C_7H_7NO_2$	25	1,6	10	100	1200
7.	глицерин	$C_3H_8O_3$	15	1,4	21	101	1000
8.	этанол	C_2H_6O	80	1,7	10	104	900
9.	диэтиловый эфир	$C_4H_{10}O$	5	1,9	25	102	800
10.	толуол	C_7H_8	10	1,5	20	100	1100
11.	ксилол	C_8H_{10}	7	1,1	-10	101	1200
12.	этиленгликоль	$C_2H_6O_2$	4	1,2	12	100	950
13.	хлоргептан	$C_7H_{15}Cl$	5	2,1	31	98	1100
14.	хлоранилин	C_6H_6NCl	1	1,4	17	102	1000
15.	гексаналь	$C_6H_{12}O$	18	1,1	-5	100	650
16.	дибутиламин	$C_8H_{19}N$	35	1,3	25	105	700
17.	бензилтиол	C_7H_8S	48	1,6	25	103	880
18.	диоксан	$C_4H_8O_2$	56	1,4	10	97	590
19.	динитротолуол	$C_7H_6O_4N_2$	14	1,7	21	103	620
20.	терпинеол	$C_{10}H_{18}O$	11	1,9	-10	100	1000

Глава 1. Материальный баланс процесса горения

21.	нитроэтан	$C_2H_5O_2N$	8	1,4	25	101	900
22.	тиофен	C_4H_4S	25	1,7	0	103	800
23.	эвгенол	$C_{10}H_{12}O_2$	30	1,9	5	100	1100
24.	цианамид	CH_2N_2	49	1,5	12	101	1200
25.	крезол	C_7H_8O	52	1,1	22	104	950

7. Рассчитайте, при горении какого из веществ – метана CH_4 , ацетилен C_2H_2 или бутана C_4H_{10} – в продуктах горения будет больше содержание диоксида углерода, если в первом случае горение происходило с коэффициентом избытка воздуха, равным 1,7, во втором - 2,0, а в третьем – 2,5.

8*. Злоумышленники планируют подорвать сейф объемом 100 дм^3 . Его наполняют 5 дм^3 водорода ($T = 298 \text{ K}$) и, во избежание шума, сейф погружают в холодное озеро ($T = 280 \text{ K}$), потом смесь поджигают. Давление внутри сейфа до поджигания смеси составлял 100 кПа. Процесс можно считать изохорным. Найти:

- а) сколько молей газа находится в сейфе до зажигания (значение мольных долей водорода, кислорода, азота);
- б) сколько молей газа осталось в сейфе после сгорания при условии, что вода, которая образовалась, целиком сконденсировалась;
- в) какая величина давления продуктов реакции после охлаждения?

9*. Определить коэффициент избытка воздуха, если для сгорания 7 кг этилацетата $C_4H_8O_2$ фактически израсходовано 240 м^3 воздуха при температуре $21\text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $101,3\text{ кПа}$.

10*. Для проведения сварочных работ необходимо емкость объемом 50 м^3 из под бензола C_6H_6 заполнить сухими продуктами его горения. Сколько нужно сжечь бензола и какой должен быть коэффициент избытка воздуха, чтобы в продуктах горения содержалось не больше 5 % кислорода. Условия считать нормальными.

11. Для жидкостей, указанных в таблице, определить массу сгоревшего горючего вещества и процентное содержание заданного продукта горения (ПГ) в объеме помещения, если известно, при каком содержании кислорода в воздухе горение прекратилось. Начальные условия приведены в таблице. Принять, что во время горения происходит образование только продуктов полного сгорания.

№	Вещество	Формула	$V_{\text{пр}},$ м^3	$t_{\text{нач}},$ $^{\circ}\text{C}$	$P_{\text{о}},$ кПа	Кон. содер- жание $\text{O}_2, \%$	Иско- мый продукт горения
1.	бензол	C_6H_6	250	18	100	14,6	H_2O
2.	этиленгли- коль	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$	150	19	98	14,2	N_2
3.	хлорпентан	$\text{C}_5\text{H}_{11}\text{Cl}$	120	28	102	12,5	HCl
4.	хлорбензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	100	15	101	16,3	CO_2
5.	уксусная кислота	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	200	20	103	11,7	H_2O
6.	нитробензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_2\text{N}$	350	22	99	10,5	N_2
7.	сероуглерод	CS_2	180	15	104	15,2	SO_2
8.	этилбензол	C_8H_{10}	80	20	100	14,8	CO_2
9.	циклогексан	C_6H_{12}	120	0	101	15,5	H_2O
10	диэтилбензол	$\text{C}_{10}\text{H}_{14}$	100	25	102	16,0	N_2

12*. Для веществ, представленных в таблице, рассчитать объем и процентное содержание заданного продукта горения при сгорании данной массы жидкости в закрытом помещении при стандартных условиях. Объем помещения задан в таблице.

№	Вещество	Формула	m, кг	V _{пом} , м ³	ПГ, который необходимо определить
1.	ксилол	C ₈ H ₁₀	7	250	H ₂ O
2.	этиленгликоль	C ₂ H ₆ O ₂	4	150	N ₂
3.	хлоргептан	C ₇ H ₁₅ Cl	5	120	HCl
4.	анилин	C ₆ H ₇ N	1	150	N ₂
5.	уксусная кислота	C ₂ H ₄ O ₂	8	200	H ₂ O
6.	нитробензол	C ₆ H ₅ O ₂ N	4	350	CO ₂
7.	сероуглерод	CS ₂	2	180	SO ₂
8.	пропилбензол	C ₉ H ₁₂	1	120	N ₂
9.	аминобутан	C ₄ H ₁₁ N	5	100	CO ₂
10.	этилэтаноламин	C ₆ H ₁₅ ON	3	80	H ₂ O

13. Определить теоретический и действительный объемы воздуха, объем и состав продуктов горения при сгорании заданного количества горючего газа следующего состава, если горение проходило при указанных в таблице условиях.

14. Определить объем воздуха, объем и состав продуктов горения при сгорании заданной массы вещества следующего состава, влажности (W), зольности (A). Горение происходило при условиях, указанных в таблице.

Глава 1. Материальный баланс процесса горения

№	Состав горючего газа, %							$V_{\text{газ}}, \text{ м}^3$	α	$t_o, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{пр}}, \text{ }^\circ\text{C}$
	CH_4 (C_2H_4)	CO (N_2)	H_2 (H_2O)	C_5H_{12} (C_2H_2)	C_4H_{10} (C_3H_8)	H_2S (C_2H_6)	O_2				
1.	60	20	–	(20)	–	–	–	5	1,1	20	950
2.	40	30	20	–	–	–	10	15	1,2	12	890
3.	(40)	15	20	–	(20)	–	5	21	2,1	31	780
4.	15	–	–	(35)	(15)	20	15	12	1,4	17	850
5.	35	–	(10)	(25)	25	–	5	2	2,4	7	750
6.	25	5*	10	35	–	(20)	5	16	1,6	15	1085
7.	25	–	60	(5)	–	5	5	11	3,6	10	985
8.	15	–	15	(40)	10	(15)	5	35	1,4	25	1005
9.	10	(15)	22	(30)	(20)	–	3	52	2,5	15	710
10.	25	15	–	30	–	(25)	5	16	1,8	10	910
11.	(45)	20	(5)	(15)	10	–	5	50	2,2	45	1200
12.	65	15*	15	–	–	3	2	70	1,7	20	950
13.		20		50		(30)	–	30	1,7	21	1000
14.		10	10		(70)	6	4	50	1,9	10	650
15.	35	40		25			–	48	1,5	25	700
16.	(10)			20	32	30	8	20	1,1	20	880
17.	50			10	10	24	6	15	1,2	-9	590
18.		5	(8)	5	80		2	35	2,1	12	620
19.	4	6*	(30)			60	–	18	1,4	31	1000
20.			40	30	27		3	46	1,1	17	900
21.		25		(45)	23		7	75	1,3	-5	800
22.	10			10	40	(30)	10	60	1,6	25	450
23.	39		20		20	10	11	37	1,4	10	580
24.				18	10	70	2	10	1,7	25	600
25.	(35)		25		(35)		5	15	1,9	15	730

* – содержание в газе CO_2 .

15. Из емкости объемом $1,8 \text{ м}^3$ вытесняют водой газовую смесь такого состава: H_2 – 7 %, CH_4 – 30 %, C_2H_5 – 50 %, C_4H_{10} – 10 %, H_2S – 3 %. Рассчитать объем воздуха при стандартных условиях, необходимый для полного сгорания в виде диффузионного факела всего объема газа, если коэффициент избытка воздуха $\alpha = 3$. Растворимость газа в воде не учитывать.

№	Состав горючего вещества, %						m, кг	α	t _о , °С	P _о , кПа	t _{пр} , °С	
	вещество	С	О	Н	S	N (W)						P (A)
1.	мазут	85	0,4	14	0,3	0,3	–	2,6	2,1	12	86,0	950
2.	резина	83		11	3		3	5,2	1,1	22	106	970
3.	битумная смола	80		11	6	3	–	14,5	2,1	5	103	700
4.	капроновая смола	78	6	9		7	–	12	2,5	25	100	830
5.	древесина	42	43	5		(9)	(4)	16	2,6	7	93	810
6.	– « –					(8)	(5)			35	95	650
7.	нефть	81	1	11	1	(6)		25	2,1	12	86	950
8.	ядохимикаты	53	10	21	8		8	52	2,6	5	105	970
9.	– « –	68	12	8	5	(5)	(2)		1,4	22	102	550
10.	– « –	70	5	12	4	3	6		2,0	18	98	900
11.	эпоксидная смола	75		14	5	6	–	45	2,1	17	103	750
12.	– « –	72	12	8		8	–	30	1,9	22	99	660
13.	керосин	85	1	13	1	–	–	15	1,5	12	101	830
14.	бурый уголь	76	5	6	2	2	(9)	80	2,3	16	100	650
15.	– « –	70	8	8	3		(8)	45	1,4	-7	103	880
16.	– « –	73	7	6	2	1	(11)	60	1,3	28	95	740
17.	– « –	72	8	7	1		(12)	75		16	98	430
18.	каменный уголь	78	2	15	1,5	3,5	(8)	50	2,2	20	99	950
19.	– « –	80	5	9	2	–	(4)	85	2,5	10	97	580
20.	– « –	76	6	10	3	–	(5)	90	1,6	-5	104	840

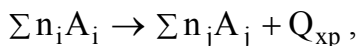
16*. В сушильной камере размерами 8x5x3 м произошел пожар с горением древесины состава: С – 47 %; Н – 5 %; О – 40 % при влажности древесины $W = 8$ %. Сколько древесины сгорело, если пламенное горение прекратилось при снижении концентрации кислорода до 14 %. Условия пожара: температура 1000 °С, давление 98 кПа.

17*. Определить необходимый расход воздуха за 1 час горения для полного сгорания природного газа такого состава: H_2 – 6 %; CH_4 – 75 %; C_2H_6 – 3 %; C_3H_8 – 5 %; O_2 – 11 %, если расход газовой горелки составляет $45 \text{ л} \cdot \text{хв}^{-1}$.

ГЛАВА 2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

Энергетический баланс процесса горения отображает закон сохранения энергии при протекании химического превращения, соответственно первому закону термодинамики. Он показывает, что общий запас внутренней энергии или энтальпии веществ, которые реагируют, равняется сумме внутренней энергии или энтальпии продуктов сгорания и теплоте, которая выделилась во время реакции, при условиях, что давление и температура в системе не изменялись (изобарно-изотермический процесс), или не изменялись объем и температура в системе (изохорно-изотермический процесс) [4] – [6].

Расчет энергетического баланса осуществляют соответственно термохимическому уравнению реакции согласно закону Г.И. Гесса, когда в уравнении указывают тепловой эффект реакции:



где n_i – количество молей исходных веществ A_i ;

n_j – количество молей продуктов реакции A_j ;

Q_{xp} – тепловой эффект реакции.

Тепловой эффект реакции - количество тепла, которое выделяется или поглощается системой при протекании в ней необратимой химической реакции (химическая энергия превращается в тепловую) при условиях постоянства температуры и объема или температуры и давления.

Начальный и конечный уровни энергии системы отличаются между собой на величину теплоты реакции $Q_{\text{хр}}$:

$$E_{\text{кон}} - E_{\text{нач}} = Q_{\text{хр}}. \quad (2.1)$$

За меру энергии принимают величину внутренней энергии U или энтальпию H системы.

Внутренняя энергия системы – это общий запас энергии, сумма кинетической энергии ее частиц и потенциальной энергии их взаимодействия, в частности энергия химических связей.

Энтальпия – это внутренняя энергия системы, в которой происходит работа расширения при условиях постоянного давления:

$$\Delta H = \Delta U + P \cdot \Delta V, \quad (2.2)$$

или с учетом уравнения состояния идеального газа $PV = nRT$:

$$\Delta H = \Delta U + \Delta nRT, \quad (2.3)$$

где Δn – разность между количеством молей продуктов реакции и исходных веществ.

Внутренняя энергия и энтальпия системы не имеют нуля или точки отсчета, поскольку нельзя систему привести в состояние, когда она не будет иметь энергии. Поэтому для определения энергетики реакции достаточно найти изменение энергии (ΔH , ΔU) во время реакции.

Тепловой эффект химической реакции возникает за счет изменения в системе или внутренней энергии ΔU (при постоянном объеме системы), или энтальпии ΔH (если давление в системе не изменяется). Реакции горения почти всегда протекают при постоянном давлении, т.е., их тепловой эффект определяется изменением именно энтальпии системы.

Процесс горения является самопроизвольным, т.е. во время горения система переходит в более стойкое состояние, которое отвечает уменьшению внутренней энергии системы, которая идет на выполнение полезной работы химической реакции. Полезная работа определяется по помощи термодинамических потенциалов Гиббса (ΔG),

при условии постоянных давления и температуры, или Гельмгольца (ΔF) при условии постоянных объема и температуры:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S; \quad \Delta F = \Delta U - T\Delta S, \quad (2.4)$$

где T – абсолютная температура системы;

ΔS – энтропия системы.

Произвольному процессу отвечает уменьшение этих параметров (внутренней энергии), т.е.

$$\Delta G_{P,T} < 0, \quad \Delta F_{V,T} < 0. \quad (2.5)$$

Во время горения энтропия системы возрастает $\Delta S > 0$, из-за того, что, как правило, количество молей системы увеличивается $\Delta n > 0$, а температура системы возрастает. При этих условиях значения термодинамических потенциалов падает лишь в случаях, когда $\Delta H < 0$ или $\Delta U < 0$.

В тех случаях, когда энтальпия или внутренняя энергия системы после реакции уменьшается, речь идет о выделении энергии, т.е. реакция является *экзотермической* ($\Delta H < 0$, $\Delta U < 0$). Когда энтальпия конечных продуктов больше, чем исходных, то реакция может протекать только при условии подведения энергии в систему, т.е. она является *эндотермической* ($\Delta H > 0$, $\Delta U > 0$). Таким образом, реакции горения всегда является экзотермическим процессом.

Согласно первому закону термодинамики, тепло, которое выделилось в системе, равняется:

$$-dQ = dU + PdV = dH - VdP. \quad (2.6)$$

Теплота реакции не зависит от пути, по которому идет процесс, а только от начального и конечного состояния системы (закон Гесса). Если горение происходит при постоянном давлении, т.е. $dP = 0$, теплота реакции равняется разности энтальпий системы в начальном и конечном состоянии:

$$Q_p = -\int dH = -\Delta H. \quad (2.7)$$

Если же сгорание произошло в закрытом объеме или, как во время взрыва, при неизменном объеме, то $dV = 0$ и теплоту реакции можно выразить соотношением:

$$Q_v = -\int dU = -\Delta U. \quad (2.8)$$

Таким образом, теплота реакции является функцией состояния системы и существенным образом зависит от того, в каком конечном состоянии находятся продукты реакции, например, вода – в виде пара или в виде жидкости, углерод - в виде графита или алмаза (т.е. в зависимости от кристаллической структуры) и т.п.

Теплотой сгорания называется количество тепла, которое выделяется при полном сгорании единицы количества горючего вещества с образованием продуктов полного сгорания; при этом принимают, что начальные и конечные продукты находятся при стандартных условиях.

Для расчета теплового эффекта химической реакции горения используют стандартную теплоту образования соединения из простых веществ:

$$\Delta H_{\text{гор}}^{\circ} = \sum_i n_{\text{пр}_i} \Delta H_{\text{ф}_\text{пр}_i}^{\circ} - \sum n_{\text{гс}} \Delta H_{\text{ф}_\text{гс}}^{\circ}, \quad (2.9)$$

где $\Delta H_{\text{гор}}^{\circ}$ – стандартная теплота сгорания, кДж моль⁻¹;

$\Delta H_{f_{пгi}}^0$ – стандартная теплота образования i -го продукта

сгорания, кДж моль⁻¹;

$n_{пгi}$ – количество молей i -го продукта сгорания;

$\Delta H_{f_{гс}}^0$ – стандартная теплота образования компонентов горючей смеси, кДж моль⁻¹;

$n_{гс}$ – количество молей компонентов горючей смеси.

Стандартная теплота образования вещества ΔH_f^0 – теплота реакции, в которой при стандартных условиях ($P = 101,3$ кПа, $T = 298$ К) образовывается один моль вещества из простых веществ, стойких при стандартных условиях.

Стандартная теплота образования простого вещества принимается равной нулю.

Из-за того, что уравнение реакции горения в воздухе составляем на 1 моль горючего вещества, а горючая смесь, кроме горючего вещества, содержит кислород и азот, стандартная теплота образования которых равняется нулю, тепловой эффект реакции горения можно записать в виде:

$$\Delta H_{гор} = \sum_i n_{пгi} \Delta H_{f_{пгi}}^0 - \Delta H_{f_{гс}}^0 \cdot \quad (2.10)$$

В зависимости от того, как определяют единицу количества горючего вещества, различают такие теплоты сгорания: *молярную* (или *стандартную*) Q (кДж моль⁻¹) – при сгорании одного моля, *массовую* Q' (кДж кг⁻¹) – при сгорании одного килограмма и *объемную* Q'' (кДж м⁻³) – при сгорании одного кубического метра горючего вещества.

В зависимости от агрегатного состояния воды, которая образовалась в процессе горения и находится в продуктах горения, различают высшую Q_v и низшую Q_n теплоту сгорания.

Высшей теплотой сгорания называют количество тепла, которое выделяется при полном сгорании единицы количества горючего вещества при условии, что горючая смесь и продукты горения находятся при стандартных условиях, а вода в продуктах горения находится в сконденсированном (жидком) состоянии.

Низшей теплотой сгорания вещества называют количество тепла, что выделяется при полном сгорании единицы количества горючего вещества при условии, что горючая смесь и продукты горения находятся при стандартных условиях, а вода, которая содержится в продуктах горения, находится в газообразном состоянии.

Схематично, разница между низшей и высшей теплотой сгорания представлена на рисунке 2.1.

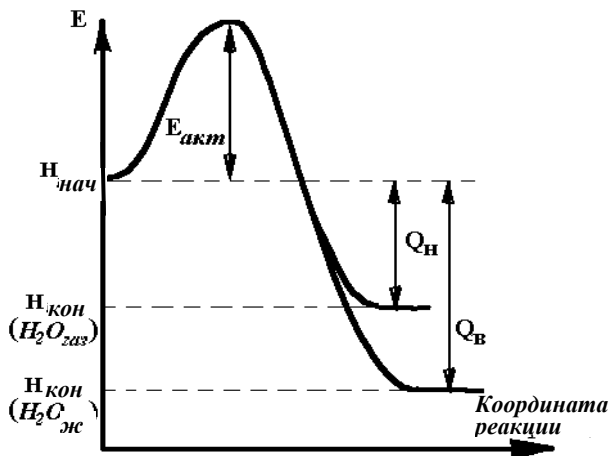


Рис. 2.1 – Тепловой эффект экзотермической реакции горения при газообразном или жидком состоянии воды ($E_{акт}$ – минимальная энергия, которую необходимо подвести к начальной системе для инициирования химической реакции)

Высшая теплота сгорания отличается от низшей на величину теплоты, которая выделяется при конденсации воды, содержащейся в продуктах горения, $Q_{конд}$:

$$Q_v - Q_n = Q_{\text{конд}}; \quad (2.11)$$

$$Q_{\text{конд}} = n_{\text{H}_2\text{O}} \Delta H_{\text{исп}}, \quad (2.12)$$

где $n_{\text{H}_2\text{O}}$ – количество молей воды в продуктах сгорания, моль;

$\Delta H_{\text{исп}}$ – молярная скрытая теплота испарения воды, кДж·моль⁻¹.

С учетом факторов, которые влияют на теплоту сгорания вещества, таких как химический недопал, влажность материала, тепловые потери на излучение, определяют *практическую* или *рабочую теплоту сгорания* материала Q_n^p , которая всегда меньше низшей теплоты сгорания. При увеличении содержания влаги в веществе, количество энергии, израсходованное на ее испарение, увеличивается, а практическая теплота сгорания уменьшается.

Практическое значение расчета

энергетического баланса

Основой расчета энергетического баланса является расчет теплоты сгорания. Теплота сгорания имеет большое практическое значение при расчете параметров пожарной опасности веществ и параметров развития пожара.

1. Теплоту сгорания используют для расчета пожарной нагрузки $R_{\text{пож}}$, $\text{МДж}\cdot\text{м}^{-2}$, которая является количественной характеристикой теплового влияния пожара на строительные конструкции.

2. Низшую теплоту сгорания используют для определения характеристик пожарной опасности веществ, а именно: температуры горения и взрыва вещества, нижнего концентрационного предела распространения пламени, максимального давления взрыва, скорости нарастания давления при взрыве.

3. По теплоте сгорания можно определить горючесть вещества. Экспериментально доказано, что вещества являются негорючими, если они не относятся к взрывоопасным и их низшая теплота сгорания меньше чем $1830 \text{ кДж}\cdot\text{м}^{-3}$ для газов и пара жидкостей или $2100 \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}$ для твердых горючих материалов.

§ 1. Расчет теплоты сгорания индивидуальных веществ и сложных материалов

Для расчета стандартного теплового эффекта реакции горения используют стандартную теплоту образования индивидуальных веществ ΔH_f^0 из элементов. Ее также применяют для расчета показателей пожарной опасности: концентрационных и температурных пределов распространения пламени, минимальной флегматизирующей концентрации негорючих газов и др.

§ 1.1. Расчет стандартной теплоты образования индивидуальных веществ

Для оценки стандартной теплоты образования вещества в газообразном состоянии пользуются значениями энергий разрыва химических связей между атомами данного вещества:

$$\Delta H_f^0 = \sum_i \Delta(\Delta H_f^0)_i n_i, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}, \quad (2.13)$$

где $\Delta(\Delta H_f^0)_i$ – аддитивный вклад связи i -го типа в энтальпию молекулы, см. табл. 1.7., $\text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$;

n_i – количество связей i -го типу в молекуле.

Аддитивные вклады – это значение энергии разрыва химических связей, которые зависят от типа атомов, их валентности, кратности связи, наличия взаимной сопряженности связей.

Таблица 2.1 – Аддитивные вклады связей разных типов при расчете стандартной теплоты образования вещества

Тип связи	Вклад $\Delta(\Delta H_f^0)$, кДж·моль ⁻¹	Тип связи	Вклад $\Delta(\Delta H_f^0)$, кДж·моль ⁻¹
C – C	19,645	C – N ⁵	-21,186
C = C	115,767	C – N ³	41,869
C \cdots C (аром. связь)	22,483	O = N ⁵	-3,684
C – H	-19,703	O – N ⁵	45,763
C – O	-49,866	H – N ³	-5,904
C = O	-134,19	O – H	-123,681

***Методика расчета стандартной теплоты
образования***

1. Записать структурную формулу вещества с обозначением видов химических связей.
2. Определить тип и количество связей i-го типа.
3. По табл. 2.1 определить величины аддитивных вкладов связей $\Delta(\Delta H_f^0)$.

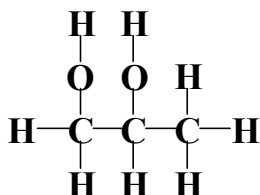
4. Рассчитать теплоту образования вещества ΔH_f° по формуле (2.13).

Пример решения задачи

Рассчитать теплоту образования пропиленгликоля.

Решение

1. Определяем структурную формулу пропиленгликоля:



2. Определяем тип, количество связей и их аддитивные вклады $\Delta(\Delta H_f^\circ)$ в теплоту образования вещества. Для удобства составляем таблицу:

Тип связи	Количество связей	Вклад $\Delta(\Delta H_f^\circ)$, кДж·моль ⁻¹
C – C	2	19,65
C – H	6	-19,7
C – O	2	-49,9
O – H	2	-123,68

3. Рассчитываем теплоту образования пропиленгликоля по формуле (2.13):

$$\begin{aligned}\Delta H_f^0 &= 19,65 \cdot 2 + (-19,7)6 + (-49,9)2 + (-123,7)2 = \\ &= -426 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.\end{aligned}$$

Вывод: рассчитанная теплота образования пропиленгликоля равняется минус 426,0 кДж·моль⁻¹. Согласно справочным данным [12] стандартная теплота образования этого вещества равняется минус 499,90 кДж·моль⁻¹, таким образом относительная погрешность расчета составляет 14,8 %.

§ 1.2. Расчет теплоты сгорания индивидуальных веществ

Молярную (стандартную) теплоту сгорания (высшую и низшую) рассчитывают по закону Гесса, используя термохимическую систему знаков для теплоты сгорания (2.10):

$$Q_{\text{гор}} = \left| \Delta H_{\text{гор}}^0 \right|, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$Q_{\text{гор}} = \left| \sum_i \Delta H_{f \text{ пр } i}^{\circ} \cdot n_{\text{пр } i} - \Delta H_{f \text{ гр}}^{\circ} \right|, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (2.14)$$

Пересчет молярной теплоты сгорания (высшей и низшей) $Q_{\text{гор}}$ в массовую $Q'_{\text{гор}}$ выполняют по формуле:

$$Q'_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{гор}} \cdot 1000}{\mu_{\text{гр}}}, \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}, \quad (2.15)$$

где $\mu_{\text{гр}}$ – молярная масса горючего вещества, $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$.

Для веществ в газообразном состоянии пересчет молярной теплоты сгорания $Q_{\text{гор}}$ в объемную $Q''_{\text{гор}}$ проводят по формуле:

$$Q''_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{гор}} \cdot 1000}{V_{\mu}}, \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (2.16)$$

где V_{μ} – молярный объем газа при данных условиях, $\text{м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$.

Теплота образования горючих и некоторых других веществ, которые могут присутствовать в продуктах горения, приведена в таблицах 4, 6, 7 приложений и в справочнике [13].

***Методика расчета теплоты сгорания
индивидуального вещества***

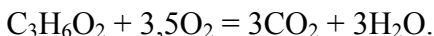
1. Составить уравнение реакции горения вещества.
2. Определить стандартные теплоты образования продуктов горения и горючего вещества и рассчитать высшую и низшую молярную теплоту сгорания по формуле (2.14).
3. Определить молярную массу вещества.
4. Пересчитать молярную теплоту сгорания в массовую по формуле (2.15).
5. Рассчитать молярный объем газа при данных условиях по формуле (1.10).
6. Пересчитать молярную теплоту сгорания в объемную по формуле (2.16).

Пример решения задачи

Определить высшие и низшие стандартную, массовую и объемную теплоты сгорания этилформиата $C_3H_6O_2$ при стандартных условиях.

Решение

1. Составляем уравнение реакции горения этилформиата:



2. Рассчитываем молярные высшую и низшую теплоты сгорания этилформиата по закону Гесса (2.14).

Значение стандартных теплот образования продуктов горения выбираем по таблице 4 приложений; а стандартную теплоту образования этилформиата – по таблице **Ошибка!**

Источник ссылки не найден. приложений:

этилформиат $\Delta\text{H}_{\text{fC}_3\text{H}_6\text{O}_2}^{\circ} = -371,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$;

углекислый газ $\Delta\text{H}_{\text{fCO}_2}^{\circ} = -393,5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$;

вода в состоянии пара $\Delta\text{H}_{\text{fH}_2\text{O}(\text{r})}^{\circ} = -241,8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$;

вода в состоянии жидкости $\Delta\text{H}_{\text{fH}_2\text{O}(\text{ж})}^{\circ} = -285,8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

$$\begin{aligned} Q_{\text{в}} &= \left| n_{\text{CO}_2} \Delta\text{H}_{\text{fCO}_2}^{\circ} + n_{\text{H}_2\text{O}} \Delta\text{H}_{\text{fH}_2\text{O}(\text{ж})}^{\circ} - \Delta\text{H}_{\text{fГр}}^{\circ} \right| = \\ &= \left| 3 \cdot (-393,5) + 3 \cdot (-285,8) - (-371,2) \right| = 1667,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \end{aligned}$$

$$Q_H = \left| n_{\text{CO}_2} \Delta H_{f\text{CO}_2}^0 + n_{\text{H}_2\text{O}} \Delta H_{f\text{H}_2\text{O}(\text{r})}^0 - \Delta H_{f\text{rп}}^0 \right| =$$

$$= \left| 3 \cdot (-393,5) + 3 \cdot (-241,8) - (-371,2) \right| = 1535,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Определяем молярную массу этилформиата:

$$\mu_{\text{гв}} = 3 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 2 \cdot 16 = 74 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}.$$

4. Пересчитываем молярные теплоты сгорания в массовые по формуле (2.15):

$$Q'_{\text{в}} = \frac{1667,7 \cdot 1000}{74} = 22536,3 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1},$$

$$Q'_{\text{н}} = \frac{1535,7 \cdot 1000}{74} = 20752,6 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

5. Молярный объем газа при стандартных условиях $V_{\mu} = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$.

6. Пересчитываем молярные теплоты сгорания в объемные по формуле (2.16):

$$Q''_{\text{В}} = \frac{1667,7 \cdot 1000}{24,4} = 67486,8 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3},$$

$$Q''_{\text{Н}} = \frac{1535,7 \cdot 1000}{24,4} = 63987,1 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

Вывод: этилформиат имеет такие теплоты сгорания:
молярные $Q_{\text{В}} = 1667,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$, $Q_{\text{Н}} = 1535,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$;
массовые $Q'_{\text{В}} = 22536,3 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$, $Q'_{\text{Н}} = 20752,6 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$;
объемные $Q''_{\text{В}} = 67486,8 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}$, $Q''_{\text{Н}} = 63987,1 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}$.

§ 1.3. Расчет теплоты сгорания сложных веществ и материалов

Теплота сгорания газовых смесей обусловлена их составом и теплотой сгорания каждого компонента. Известные значения объемных теплот сгорания основных газов при нормальных условиях сведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Значение высшей и низшей объемной теплоты сгорания некоторых газов и паров при нормальных условиях

Вещество		Теплота сгорания, кДж·м ⁻³	
название	формула	высшая $Q''_в$	низшая $Q''_н$
водород	H ₂	12750	10790
оксид углерода (II)	CO	12640	12640
сероводород	H ₂ S	25350	23700
метан	CH ₄	39820	35880
ацетилен	C ₂ H ₂	55123	53320
этилен	C ₂ H ₄	57623	54016
этан	C ₂ H ₆	70310	64360
пропан	C ₃ H ₈	101210	93180
н-бутан	C ₄ H ₁₀	133800	123570
н-пентан	C ₅ H ₁₂	169270	150630
н-гексан	C ₆ H ₁₄	187400	187400
н-гептан	C ₇ H ₁₆	216880	200550

Теплота сгорания газовых смесей является суммой теплот сгорания компонентов смеси с учетом их долевого содержания:

$$\text{объемная: } Q''_{\text{н(в)сум}} = \sum_i Q''_{\text{н(в)}_i} \Gamma_i, \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (2.17)$$

$$\text{массовая: } Q'_{\text{н(в)сум}} = \sum_i Q'_{\text{н(в)}_i} g_i, \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1},$$

где $Q''_{\text{н(в)}_i}$ – низшая (или высшая) объемная теплота сгорания i -го горючего компонента смеси, $\text{кДж} \cdot \text{м}^{-3}$;

$Q'_{\text{н(в)}_i}$ – низшая (или высшая) массовая теплота сгорания i -го горючего компонента смеси, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$;

Γ_i – объемная доля i -го горючего компонента в газовой смеси;

g_i – массовая доля i -го горючего компонента в газовой смеси.

Объемная Γ_i и массовая g_i доли компонента газовой смеси связаны между собой по формуле:

$$g_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_k r_k \mu_k},$$

где μ_i – молярная масса соответствующего i -го компонента.

Для горючих веществ с неопределенной структурой или для тех, которые являются смесью химических соединений, массовую теплоту сгорания определяют по уравнению Менделеева, согласно которому высшая теплота сгорания:

$$Q'_в = 339,4\varphi_C + 1256,8\varphi_H + 108,9(\varphi_S - \varphi_O - \varphi_N), \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}; \quad (2.18)$$

низшая теплота сгорания учитывает конденсацию паров воды в продуктах горения:

$$\begin{aligned} Q'_н &= Q'_в - 25,1(9\varphi_H + W) = \\ &= 339,4\varphi_C + 1256,8\varphi_H + 108,9(\varphi_S - \varphi_O - \varphi_N) - 25,1(9\varphi_H + W), \\ &\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}, \end{aligned} \quad (2.19)$$

где $\varphi_C, \varphi_H, \varphi_S, \varphi_O, \varphi_N, W$ – соответственно массовое процентное содержание углерода, водорода, серы, кислорода, азота и влаги в горючем веществе.

Формулу Менделеева можно использовать для расчета теплоты сгорания как индивидуальных веществ, так и веществ сложного химического состава.

Методика определения теплоты сгорания газовой смеси

1. Составить уравнение реакции горения в воздухе для каждого горючего компонента.

2. Определить теплоту образования каждого горючего компонента смеси и продуктов сгорания по таблице приложений **Ошибка! Источник ссылки не найден.** или рассчитать по формуле (2.13).

3. Определить низшую или высшую молярную теплоту сгорания i -го компонента смеси по закону Гесса или по справочным данным [13].

4. Пересчитать полученные значения молярной теплоты сгорания каждого компонента смеси в объемную теплоту сгорания по формуле (2.16) или воспользоваться значениями объемной теплоты сгорания основных газов по таблице 2.2.

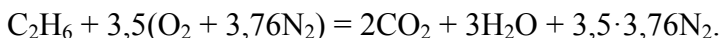
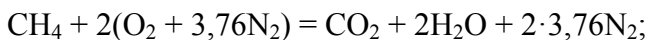
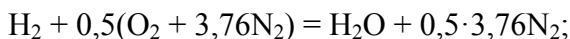
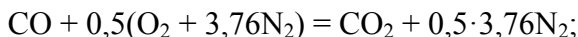
5. Определить объемную теплоту сгорания газовой смеси исходя из процентного содержания каждого компонента по формуле (2.17).

Пример решения задачи

Определить низшую теплоту сгорания коксового газа следующего состава: CO – 6,8 %, H₂ – 57 %, N₂ – 7,7 %, CO₂ – 2,3 %, CH₄ – 22,5 %, C₂H₆ – 3,7 % при стандартных условиях.

Решение

1. Составляем уравнение реакций горения в воздухе для горючих компонентов смеси:



2. Определяем теплоту образования каждого компонента смеси и продуктов сгорания по справочнику [14]:

оксид углерода (II) $\Delta H_{\text{fCO}}^{\circ} = -110,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$,

водород	$\Delta H_{fH_2}^{\circ} = 0 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$,
метан	$\Delta H_{fCH_4}^{\circ} = -74,85 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$,
этан	$\Delta H_{fC_2H_6}^{\circ} = -84,67 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$,
азот	$\Delta H_{fN_2}^{\circ} = 0 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$,
вода в состоянии пара	$\Delta H_{fH_2O(g)}^{\circ} = -241,8 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$,
углекислый газ	$\Delta H_{fCO_2}^{\circ} = -393,5 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$.

3. Рассчитываем молярную низшую теплоту сгорания каждого горючего компонента смеси по формуле (2.14):

$$Q_{HCO} = |(-393,5) \cdot 1 - (-110,6)| = 283,18 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1},$$

$$Q_{HN_2} = |(-241,8) \cdot 1 - 0| = 241,84 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1},$$

$$Q_{HCH_4} = |(-393,5) \cdot 1 + (-241,8) \cdot 2 - (-74,8)| = 802,6 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1},$$

$$Q_{HC_2H_6} = |(-393,5) \cdot 2 + (-241,8) \cdot 3 - (-84,7)| = 1428,4 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}.$$

4. Рассчитываем низшую объемную теплоту сгорания горючих компонентов смеси по формуле (2.16), молярный объем газа при стандартных условиях составляет $V_{\mu} = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$:

$$Q''_{\text{HCO}} = \frac{283,18 \cdot 1000}{24,4} = 11799 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q''_{\text{H}_2} = \frac{241,84 \cdot 1000}{24,4} = 10077 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q''_{\text{HCH}_4} = \frac{802,61 \cdot 1000}{24,4} = 33442 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q''_{\text{HC}_2\text{H}_6} = \frac{1428,41 \cdot 1000}{24,4} = 59517 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

5. Определяем низшую объемную теплоту сгорания коксового газа заданного состава:

$$Q''_{\text{нсм}} = \frac{11799 \cdot 6,8 + 10077 \cdot 5,7 + 33442 \cdot 22,5 + 59517 \cdot 3,7}{100} =$$
$$= 16273 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

Ответ: низшая объемная теплота сгорания коксового газа заданного состава при данных условиях – 16273 кДж·м⁻³.

Методика определения теплоты сгорания

сложных веществ и смесей

1. Если процентное содержание составных элементов в горючем веществе не известен, рассчитать его по формуле (1.2).

2. Рассчитать высшую и низшую теплоту сгорания сложного вещества по формуле Менделеева (2.18), (2.19).

Пример решения задачи

Определить низшую массовую теплоту сгорания и дать разъяснения, во время горения какого материала выделится больше энергии: дерева с элементным составом: С – 49 мас. %; Н – 6,5 мас. %; О – 39 мас. %; N – 0,5 мас. %; W – 5 мас. %; или каменного угля такого состава: С – 79,4 мас. %; Н – 5,3 мас. %; О – 10,3 мас. %; S – 2,8 мас. %; W – 1,2 мас. %.

Решение

Определяем низшую массовую теплоту сгорания для каждого материала по формуле Менделеева:

- для древесины:

$$Q'_{\text{н}} = 339,4 \cdot 49 + 1256,8 \cdot 6,5 - 108,9(39 + 0,5) - 25,1(9 \cdot 6,5 + 5) = 18841,6 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1};$$

- для угля:

$$Q'_H = 339,4 \cdot 79,4 + 1256,8 \cdot 5,3 - 108,9(10,3 - 2,8) - 25,1 \cdot (9 \cdot 5,3 + 1,2) = 31541,4 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

Вывод: при сгорании 1 кг каменного угля тепла выделится больше, чем при сгорании 1 кг древесины.

§ 1.4. Расчет пожарной нагрузки

Величину теплоты сгорания используют при расчете пожарной нагрузки $R_{\text{пож}}$, которая является количественной характеристикой теплового влияния пожара на строительные конструкции.

Удельная пожарная нагрузка – это количество тепла, которая может выделиться при сгорании веществ и материалов с одного квадратного метра поверхности пола помещения.

Пожарную нагрузку в помещении разделяют на временную и постоянную и определяют как сумму произведений масс всех горючих материалов на их низшую теплоту сгорания, отнесенную к единице поверхности пола, по формуле:

$$P_{\text{пож}} = \frac{\sum_i m_i Q'_{\text{н}i}}{S_{\text{пол}}}, \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (2.20)$$

где m_i – масса i -го горючего материала, кг;

$Q'_{\text{н}i}$ – низшая массовая теплота сгорания i -го горючего материала, МДж·кг⁻¹;

$S_{\text{пол}}$ – площадь пола, м².

Методика расчета пожарной нагрузки

1. Определить вид и массу горючих веществ, которые находятся в помещении.

2. Определить низшую массовую теплоту сгорания каждого вещества по табл. 5 приложений или справочникам [15], [16], [20] или рассчитать по формулам (2.15) или (2.19).

3. Рассчитать площадь пола помещения.

4. Рассчитать пожарную нагрузку по формуле (2.20).

Пример решения задачи

Рассчитать пожарную нагрузку в помещении размерами 114x38 м², если общая масса строительных деревянных конструкций помещения равняется 400 кг. В помещении хранится 400 т каучука, 30 т мазута и 10 т полиэтиленовой пленки.

Решение

1. Определяем низшие массовые теплоты сгорания горючих веществ по справочнику [17]:

древесина	13800 кДж·кг ⁻¹ ,
каучук	40200 кДж·кг ⁻¹ ,
полиэтилен в изделиях	47100 кДж·кг ⁻¹ ,
мазут	39800 кДж·кг ⁻¹ .

2. Рассчитываем площадь пола помещения:

$$S_{\text{пол}} = 114 \cdot 36 = 4104 \text{ м}^2.$$

3. Рассчитываем пожарную нагрузку в помещении:

$$\begin{aligned} P_{\text{пож}} &= \frac{(13,8 \cdot 0,4 + 40,2 \cdot 400 + 39,8 \cdot 30 + 47,1 \cdot 10)10^3}{4104} = \\ &= 4320 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}. \end{aligned}$$

Вывод: пожарная нагрузка в данном помещении составляет 4320 МДж м⁻².

§ 2. Расчет температуры горения веществ

Энергия, которая выделяется в зоне горения, тратится на подготовку горючего вещества к процессу горения, нагревание продуктов горения и на тепловые потери из зоны горения в окружающую среду за счет теплового излучения.

Температуру, до которой нагреваются продукты горения в результате тепловыделения реакции, называют *температурой горения*.

Исходя из закона Кирхгофа:

$$\Delta H_{T_2} = \Delta H_{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} \Delta c_p dT, \quad (2.21)$$

который показывает зависимость энтальпии системы от температуры, и из предположения, что вся теплота Q_n (при условии, что вода находится в виде пара), выделяющаяся во время горения, расходуется на повышение энтальпии продуктов горения, получаем для одного моля горючего вещества:

$$Q_n = \Delta H_{T_2} - \Delta H_{T_1} = \int_{T_1}^{T_2} \Delta c_p dT. \quad (2.22)$$

Отсюда для удельного объема продуктов горения индивидуального вещества или компонента смеси имеем после интегрирования следующее выражение для теплоты, которая идет на разогрев продуктов горения при постоянном давлении:

$$Q_{p_{\text{пг}}} = \sum_i v_{\text{пг}i} c_p (T_{\text{гор}} - T_0), \quad (2.23)$$

где $v_{\text{пг}i}$ – объем i -го продукта горения, который образуется при сгорании 1 моля горючего вещества, м^3 ;

c_p – среднеобъемная теплоемкость продуктов горения в условиях постоянного давления, $\text{кДж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}$;

T_0 – начальная температура системы, К ;

$T_{\text{гор}}$ – температура горения, К .

Из формулы [2.24] определим температуру горения:

$$T_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{пг}}}{\sum_i v_{\text{пг}i} c_{p_{\text{пг}i}}} + T_0, \quad (2.24)$$

или в стандартных условиях при отсутствии потерь тепла:

$$T_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{н}}}{\sum_i n_{\text{пр}i} c_{\text{р}i}} + 298, \text{ К.} \quad (2.25)$$

В зависимости от условий, в которых протекает процесс горения, различают калориметрическую, теоретическую, адиабатическую и действительную температуры горения.

Под *калориметрической температурой горения* понимают температуру, до которой нагреваются продукты горения, если соблюдены следующие условия:

1) все тепло, которое выделилось в процессе реакции, идет на нагревание продуктов горения ($Q_{\text{пр}} = Q_{\text{н}}$);

2) происходит полное сгорание горючего смеси стехиометрического состава ($\alpha = 1$);

3) в процессе образования продуктов горения не происходит их термическая диссоциация;

4) исходная горючая смесь находится при стандартных условиях (начальная температура 298 К, давление 101,3 кПа).

Если температура горения достаточно высока, то продукты горения, образующиеся в процессе реакции, могут распадаться на элементы, из которых образованы. Диссо-

циацию продуктов горения следует учитывать при температурах, больших 1700°C . При условии отсутствия потерь тепла в окружающую среду и с учетом доли тепла, которая расходуется на процесс диссоциации продуктов горения, степень нагрева продуктов горения будет представлять собой **теоретическую температуру горения**.

Адиабатическая температура горения – это температура, до которой нагреваются продукты горения с учетом того, что горение может протекать с избытком воздуха. Принимают, что потерь тепла в окружающую среду нет, поэтому, на нагревание продуктов горения и избыточного воздуха тратится вся теплота сгорания. Исходную температуру и давление горючей смеси принимают стандартными.

Действительная температура горения – это температура, до которой нагреваются продукты горения в реальных условиях. При этом учитывают, что горение может происходить с избытком или недостатком воздуха, с неполным сгоранием горючего вещества, значительными потерями тепла в окружающую среду, начальные условия, при которых находится горючая смесь, могут отличаться от стандартных.

Действительная температура горения всегда ниже, чем адиабатическая, но она всегда определяется калориметрической температурой горения и условиями теплоотдачи.

На практике используют метод оценки температуры горения по цвету тел, нагретых в зоне горения. Изменение спектра излучения зависит от температуры нагретого тела. Чем выше температура тела, тем выше интенсивность и яркость излучения. На основании этого правила можно определить так называемую яркостную температуру горения. Данные о цвете нагретых тел приведены в таблице 1.3.

Экспериментально определить температуру горения большинства веществ достаточно сложно, что обусловлено необходимостью проведения опыта при повышенных температурах; кроме того надо измерять температуру газа, находящегося в состоянии химического преобразования. Однако теория позволяет с достаточной точностью рассчитать адиабатическую температуру горения, учитывая закон сохранения энергии и химического состава вещества. Используют два расчетных метода определения адиабатической температуры горения: 1) по энтальпии продуктов горения;

2) с использованием зависимости теплоемкости продуктов горения от их температуры.

***Практическое значение расчета
температуры горения***

1. В связи с тепловым расширением газов температура горения определяет объем продуктов горения, который они будут занимать в процессе прохождения реакции горения при данном атмосферном давлении.

2. Температура горения определяет максимальное давление взрыва, а также параметры развития пожара в помещении (температуру пожара и высоту нейтральной зоны).

3. В зависимости от температуры горения веществ и материалов выбирают огнетушащие вещества, которые можно использовать при данных условиях горения, а также рассчитывают расход негорючего газа при объемном тушении пожара в помещении.

§ 2.1. Расчет адиабатической температуры горения с использованием энтальпии продуктов горения

Методика расчета адиабатической температуры горения индивидуальных веществ

1. Составить уравнение реакции горения, определить стехиометрический коэффициент β .

2. Рассчитать удельное теоретическое количество молей воздуха $n^{\circ}_в$, необходимое для горения, по формуле (1.12).

3. Рассчитать удельное действительное количество молей продуктов горения $n_{пг}$ с учетом избытка воздуха, формула (1.15).

4. Определить низшую стандартную теплоту сгорания вещества Q_H по справочным данным или рассчитать по формуле (2.14).

5. Рассчитать среднюю теплоту продуктов сгорания $Q_{р\text{ср}}$:

$$Q_{р\text{ср}} = \frac{Q_H}{n_{пг}}, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (2.26)$$

6. Путем сравнения $Q_{p_{cp}}$ с молярной энтальпией азота, определить температуру горения в первом приближении T_1 (таблица **Ошибка! Источник ссылки не найден.** приложений).

7. Рассчитать теплоту продуктов сгорания при температуре горения T_1 с использованием данных энтальпии продуктов сгорания (таблица 1 приложений) по формуле:

$$Q_{p_{пг}}^{T_1} = \sum_i \left(\Delta H_{пгi}^{T_1} \cdot n_{пгi} \right), \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (2.27)$$

8. Определить температуру горения во втором приближении T_2 : $T_2 > T_1$, если $Q_{p_{пг}}^{T_1} < Q_H$, или $T_2 < T_1$, если $Q_{p_{пг}}^{T_1} > Q_H$.

9. Рассчитать теплоту продуктов горения при температуре горения T_2 по формуле:

$$Q_{p_{пг}}^{T_2} = \sum_i \left(\Delta H_{пгi}^{T_2} \cdot n_{пгi} \right), \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (2.28)$$

10. Рассчитать температуру горения методом линейной интерполяции по формуле:

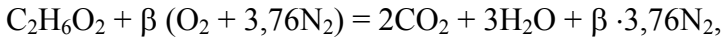
$$T_{\text{ад}} = T_1 + \frac{(T_2 - T_1) \cdot (Q_{\text{н}} - Q_{\text{р}} T_1)}{(Q_{\text{р}} T_2 - Q_{\text{р}} T_1)}, \text{ К.} \quad (2.29)$$

Пример решения задачи

Рассчитать адиабатическую температуру горения этиленгликоля $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$, если теплота его образования равняется $\Delta H_f^0 = -453,8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$, а горение проходило с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,8$.

Решение

1. Составляем уравнение реакции горения:



$$\beta = 2,5.$$

2. Рассчитываем удельное теоретическое количество молей воздуха:

$$n_{\text{в}}^0 = 4,76 \cdot 2,5 = 11,9 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Рассчитываем удельное действительное количество молей продуктов горения:

$$n_{\text{пр}} = 2 + 3 + 2,5 \cdot 3,76 + (1,8 - 1) \cdot 11,9 = 23,9 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}$$

4. Рассчитываем низшую молярную теплоту сгорания вещества по закону Гесса:

$$Q_{\text{H}} = |(-393,8) \cdot 2 + (-241,8) \cdot 3 - (-453,8)| = 1059,3 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

5. Рассчитываем среднюю теплоту продуктов сгорания по формуле [2.26]:

$$Q_{\text{р ср}} = \frac{1059,3}{23,9} = 44,3 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

6. Ориентируясь на молярную энтальпию азота, по таблицей **Ошибка! Источник ссылки не найден.** приложений определяем температуру горения в первом приближении: $T_1 = 1400 \text{ К}$.

7. Определяем энтальпию каждого продукта сгорания при температуре 1400 К и рассчитываем теплоту продуктов горения по формуле (2.27):

$$\Delta H_{\text{CO}_2}^{T_1} = 65,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T_1} = 53,5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\Delta H_{\text{N}_2}^{T_1} = 43,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad \Delta H_{\text{B}}^{T_1} = 44 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{рпг}}^{T_1} &= 2 \cdot 65,2 + 3 \cdot 53,5 + 2,5 \cdot 3,76 \cdot 43,6 + (1,8 - 1)11,9 \cdot 44 = \\ &= 1119,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \end{aligned}$$

8. Определяем температуру горения во втором приближении. Учитывая, что теплота продуктов горения при температуре $T_1 = 1400 \text{ К}$ оказалась больше, чем низшая теплота сгорания, принимаем $T_2 = 1200 \text{ К}$.

9. Определяем энтальпию продуктов горения при температуре 1200 К и рассчитываем теплоту продуктов горения по формуле (2.28):

$$\Delta H_{\text{CO}_2}^{T_2} = 53,8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T_2} = 44,5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\Delta H_{\text{N}_2}^{T_2} = 36,8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad \Delta H_{\text{B}}^{T_2} = 37,1 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{рпг}}^{T_2} &= 2 \cdot 53,8 + 3 \cdot 44,5 + 2,5 \cdot 3,76 \cdot 36,8 + (1,8 - 1)11,9 \cdot 37,1 = \\ &= 940,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \end{aligned}$$

10. Рассчитываем температуру горения методом линейной интерполяции:

$$T_{\text{ад}} = 1400 + \frac{(1200 - 1400)(1059,3 - 1119,6)}{940,2 - 1119,6} = 1333 \text{ К.}$$

Вывод: адиабатическая температура горения этиленгликоля при данных условиях равняется 1333 К.

Методика расчета адиабатической температуры горения сложных веществ

1. Определить удельный объем продуктов сгорания сложного вещества с учетом избытка воздуха.

1.1. Рассчитать удельный теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания 1 м^3 газовой смеси или 1 кг горючего материала по формуле (1.22) или (1.28), соответственно.

1.2. Рассчитать удельный теоретический объем продуктов сгорания $v_{\text{пт}}^{\circ}$ по формуле (1.36) с использованием табл. 1.5 или табл. 1.6. в зависимости от агрегатного состояния горючего вещества.

1.3. Рассчитать удельный действительный объем продуктов сгорания с учетом избытка воздуха по формуле (1.25).

2. Определить по справочным данным или рассчитать низшую массовую теплоту сгорания вещества по уравнению Менделеева (2.19) или рассчитать объемную теплоту сгорания газовой смеси по формуле (2.17).

3. Рассчитать среднюю теплоту продуктов сгорания $Q_{p_{cp}}$ как отношение низшей массовой теплоты сгорания к удельному действительному объему продуктов горения (аналогично формуле (2.26)).

4. Путем сравнения $Q_{p_{cp}}$ с объемной удельной энтальпией азота (таблица 2 приложений), определить температуру горения в первом приближении T_1 .

5. Рассчитать теплоту продуктов горения при температуре T_1 с использованием значений удельной объемной энтальпии продуктов горения при этой температуре по формуле:

$$Q_{p_{пг}}^{T_1} = \sum_i \left(\Delta H_{пг_i}^{T_1} v_{пг_i} \right) \quad (2.30)$$

6. Определить температуру горения во втором приближении T_2 : $T_2 > T_1$, если $Q_{p_{\text{пг}}}^{T_1} < Q'_H (Q''_H)$, или $T_2 < T_1$, если $Q_{p_{\text{пг}}}^{T_1} > Q'_H (Q''_H)$.

7. Рассчитать теплоту продуктов горения при температуре T_2 по формуле:

$$Q_{p_{\text{пг}}}^{T_2} = \sum_i \left(\Delta H_{\text{пг}i}^{T_2} \nu_{\text{пг}i} \right) \quad (2.31)$$

8. Рассчитать температуру горения методом линейной интерполяции по формуле (2.29).

Пример решения задачи

Рассчитать температуру горения древесины следующего состава: С – 46 %, Н – 5,5 %, О – 39,2 %, N – 0,9 %, влага W – 7 %, зола А – 1,4 %. Горение происходило при стандартных условиях с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,5$.

Решение

1. Определяем удельный действительный объем продуктов сгорания дерева заданного состава с учетом избытка воздуха.

1.1. Рассчитываем удельный теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания древесины, по формуле (1.35):

$$v_B^0 = 0,29 \left(\frac{46}{3} + 5,5 - \frac{39,2}{8} \right) = 4,6 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

1.2. Определяем удельные объемы каждого продукта сгорания при стандартных условиях, пользуясь данными таблицы 1.6, и рассчитываем удельный теоретический объем продуктов сгорания древесины заданного состава. Для удобства составляем таблицу.

Элемент	Массовая доля элемента, g	Объем продуктов сгорания, м ³ · кг ⁻¹		
		CO ₂	H ₂ O	N ₂
С	0,46	0,46 · 2,03		0,46 · 7,65
Н	0,055		0,055 · 12,2	0,055 · 22,9
Н	0,009			0,009 · 0,87
О	0,392			0,392 · (-2,87)
W	0,07		0,07 · 1,36	
Всего	0,986	0,93	0,77	3,66

$$v_{\text{пр}}^0 = 0,93 + 0,77 + 3,66 = 5,36 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

1.3. Рассчитываем удельный действительный объем продуктов сгорания с учетом избытка воздуха:

$$v_{\text{шт}} = 5,36 + (1,5 - 1) \cdot 4,6 = 7,7 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

2. Рассчитываем низшую массовую теплоту сгорания древесины по формуле Менделеева:

$$Q'_{\text{н}} = 339,4 \cdot 46 + 1256,8 \cdot 5,5 - 108,9(39,2 + 0,9) - 25,1 \cdot (9 \cdot 5,5 + 7) = 16739,8 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

3. Рассчитываем среднюю теплоту продуктов сгорания:

$$Q_{\text{ср}} = \frac{16739,8}{7,7} = 2185 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

4. Ориентируясь на удельную объемную энтальпию азота, определяем температуру горения в первом приближении: $T_1 = 1600 \text{ К}$.

5. Определяем по таблице 2 приложений объемную энтальпию продуктов горения при температуре 1600 К и рассчитываем теплоту продуктов горения по формуле (2.30):

$$\Delta H_{\text{CO}_2}^{T_1} = 3430,2 \text{ кДж}\cdot\text{м}^{-3}; \quad \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T_1} = 2809,9 \text{ кДж}\cdot\text{м}^{-3};$$

$$\Delta H_{\text{N}_2}^{T_1} = 2257,0 \text{ кДж}\cdot\text{м}^{-3}; \quad \Delta H_{\text{B}}^{T_1} = 2278,0 \text{ кДж}\cdot\text{м}^{-3};$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{рпг}}^{T_1} &= 0,93 \cdot 3430,2 + 0,77 \cdot 2809,9 + 3,66 \cdot 2257,0 + \\ &+ (1,5 - 1)4,6 \cdot 2278,0 = 18853,5 \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}. \end{aligned}$$

6. Определяем температуру горения во втором приближении. Теплота продуктов горения при температуре 1600 К: 18853,5 кДж·кг⁻¹; это больше низшей теплоты сгорания вещества 16739,8 кДж·кг⁻¹, поэтому принимаем значения температуры во втором приближении ниже, чем T₁: T₂ = 1400 К.

7. Определяем объемную энтальпию продуктов горения при температуре 1400 К и рассчитываем теплоту продуктов горения по формуле (2.31):

$$\Delta H_{\text{CO}_2}^{T_2} = 2909,0 \text{ кДж}\cdot\text{м}^{-3}; \quad \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T_2} = 2387,8 \text{ кДж}\cdot\text{м}^{-3};$$

$$\Delta H_{\text{N}_2}^{T_2} = 1946,0 \text{ кДж}\cdot\text{м}^{-3}; \quad \Delta H_{\text{B}}^{T_2} = 1963,4 \text{ кДж}\cdot\text{м}^{-3};$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{рпг}}^{T_2} &= 0,93 \cdot 2909,0 + 0,77 \cdot 2387,8 + \\ &+ 3,66 \cdot 1946,0 + (1,5 - 1)4,6 \cdot 1963,4 = 16200,8 \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}. \end{aligned}$$

8. Определяем температуру горения методом линейной интерполяции:

$$T_{гор} = 1600 + \frac{(1400 - 1600) \cdot (16739,8 - 18853,5)}{(16200,8 - 18853,5)} = 1440 \text{ К.}$$

Вывод: адиабатическая температура горения древесины данного состава при стандартных условиях равняется 1440 К.

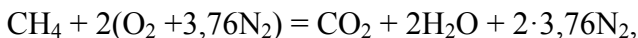
Пример решения задачи

Рассчитать температуру горения смеси такого состава: CH_4 – 50 %; C_2H_6 – 30 %; N_2 – 17 %; CO_2 – 3 %, которая сгорает без потерь тепла при нормальных условиях с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,8$.

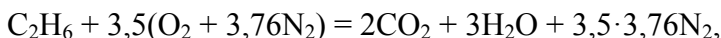
Решение

1. Определяем удельный объем продуктов сгорания из учетом избытка воздуха.

1.1. Рассчитываем удельный теоретический объем воздуха $v_{\text{в}}^0$, необходимый для сгорания 1 м³ газовой смеси, по формуле (1.32). Сперва составляем уравнения реакций горения горючих компонентов смеси:



$$\beta = 2;$$



$$\beta = 3,5;$$

$$v_{\text{всм}}^0 = \frac{2 \cdot 50 + 3,5 \cdot 30}{21} = 9,76 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

1.2. Рассчитываем удельный теоретический объем продуктов сгорания $v_{\text{пр}}^0$ по формуле (1.33) с учетом состава газовой смеси и коэффициентов табл. 1.5.

Для удобства составляем таблицу:

Компонент смеси	Объемная доля	Объем продукта сгорания, м ³ ·м ⁻³		
		CO ₂	H ₂ O	N ₂
CH ₄	0,5	1·0,5	2·0,5	7,52·0,5
C ₂ H ₆	0,3	2·0,3	3·0,3	13,16·0,3
N ₂	0,17	–	–	0,17
CO ₂	0,03	0,03	–	–
Всего	1,0	1,13	1,9	7,88

$$v_{\text{пгсм}}^0 = 1,13 + 1,9 + 7,88 = 10,9 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

1.3. Рассчитываем удельный действительный объем продуктов сгорания с учетом избытка воздуха по формуле (1.25):

$$v_{\text{пгсм}} = 10,9 + (1,8 - 1) \cdot 9,76 = 18,7 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

2. Рассчитываем низшую объемную теплоту сгорания газовой смеси по формуле (2.17). По табл. 2.2 находим низшие объемные теплоты сгорания компонентов смеси:

$$Q''_{\text{нCH}_4} = 35\,880 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \quad Q''_{\text{нC}_2\text{H}_6} = 64\,360 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q''_{\text{нсм}} = 35\,880 \cdot 0,5 + 64\,360 \cdot 0,3 = 37\,248 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Рассчитываем среднюю теплоту продуктов сгорания $Q_{\text{р.ср}}$:

$$Q_{\text{р.ср}} = \frac{37\,248}{18,7} = 1992 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

4. Ориентируясь на удельную объемную энтальпию азота (по таблице 2 приложений), определяем температуру горения в первом приближении: $T_1 = 1400$ К.

5. Определяем по таблице 2 приложений объемную энтальпию продуктов горения при температуре 1400 К и рассчитываем теплоту продуктов горения при этой температуре по формуле (2.30).

$$\Delta H_{\text{CO}_2}^{T_1} = 2909,0 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \quad \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T_1} = 2387,8 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\Delta H_{\text{N}_2}^{T_1} = 1946,0 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \quad \Delta H_{\text{B}}^{T_1} = 1963,4 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{рпг}}^{T_1} &= 1,13 \cdot 2909,0 + 1,9 \cdot 2387,8 + 7,88 \cdot 1946,0 + \\ &+ (1,8 - 1)9,76 \cdot 1963,4 = 38488,7 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}. \end{aligned}$$

6. Определяем температуру горения во втором приближении. Теплота продуктов горения при температуре 1400 К: $38488,7 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}$; это больше, чем низшая теплота сгорания газовой смеси $37248 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}$, поэтому принимаем значение температуры во втором приближении ниже, чем предыдущее значение: $T_2 = 1200$ К.

7. Определяем объемную энтальпию продуктов горения при температуре 1200 К и рассчитываем теплоту продуктов горения:

$$\Delta H_{\text{CO}_2}^{T_2} = 2399,4 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \quad \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T_2} = 1984,8 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\Delta H_{\text{N}_2}^{T_2} = 1641,2 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \quad \Delta H_{\text{B}}^{T_2} = 1655,1 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{P}_{\text{шт}}}^{T_2} &= 1,13 \cdot 2399,4 + 1,9 \cdot 1984,8 + 7,88 \cdot 1641,2 + \\ &+ (1,8 - 1)9,76 \cdot 1655,1 = 32338,1 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}. \end{aligned}$$

8. Рассчитываем температуру горения методом линейной интерполяции:

$$T_{\text{ад}} = 1400 + \frac{(1200 - 1400) \cdot (37248 - 38489)}{(32338 - 38489)} = 1360 \text{ К}.$$

Вывод: температура горения газовой смеси заданного состава при данных условиях равняется 1360 К.

§ 2.2. Определение температуры горения с

использованием теплоемкости продуктов горения

Расчет температуры горения веществ индивидуального и сложного состава можно осуществлять с использованием зависимости теплоемкости продуктов горения от их температуры по формуле (2.25).

Зависимость средней теплоемкости смеси продуктов горения от их температуры выражают уравнением:

$$c_p = a_{cm} + b_{cm}t, \quad (2.32)$$

где a_{cm} , b_{cm} – константы, которые определяются в зависимости от состава продуктов сгорания;

t – температура продуктов горения, °С.

Константы уравнения (2.32) a_{cm} , b_{cm} рассчитывают как сумму произведений числа молей (или объемов) i -го компонента продуктов горения на соответствующие константы a_i и b_i в температурной зависимости теплоемкости i -го продукта сгорания (выбирают согласно таблице **Ошибка!**

Источник ссылки не найден. приложений):

$$a_{cm} = \sum_i \left(a_i + \frac{b_i T_{ст}}{2} \right) n_{пгi}; \quad (2.33)$$

$$b_{\text{см}} = \sum_i \frac{b_i}{2} n_{\text{пр}i}. \quad (2.34)$$

Температуру горения рассчитывают по формуле:

$$t_{\text{гор}} = \frac{-a_{\text{см}} + \sqrt{a_{\text{см}}^2 + 4b_{\text{см}}Q_{\text{н}}}}{2b_{\text{см}}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.35)$$

где $Q_{\text{н}}$ – низшая удельная теплота сгорания вещества (молярная, массовая или объемная в зависимости от размерности количества продуктов сгорания).

***Методика расчета температуры горения
с использованием теплоемкости продуктов горения
для индивидуальных веществ***

1. Определить состав и удельное количество молей продуктов горения с учетом избытка воздуха.
2. Определить низшую стандартную теплоту сгорания вещества.
3. Определить константы уравнения (2.36) a_i и b_i для каждого продукта сгорания по таблице 4 приложений.

4. Рассчитать константы $a_{см}$ и $b_{см}$ для смеси продуктов горения по формулам (2.33), (2.34).

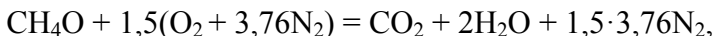
5. Рассчитать температуру горения по формуле (2.35).

Пример решения задачи

Рассчитать адиабатическую температуру горения пара метанола, если горение происходило с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,7$.

Решение

1. Определяем удельное количество молей продуктов горения и их состав с учетом избытка воздуха:



$$\beta = 1,5;$$

$$n_{\text{CO}_2} = 1 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad n_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$n_{\text{N}_2} = 1,5 \cdot 3,76 = 5,64 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\Delta n_{\text{в}} = (1,7 - 1)1,5 \cdot 4,76 = 5,0 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

2. Рассчитываем стандартную низшую теплоту сгорания метанола с учетом, что его теплота образования составляет минус $239,0 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$:

$$Q_H = |1 \cdot (-393,5) + 2 \cdot (-241,8) - (-239,0)| = 638,5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Определяем константы уравнения (2.37) a_i и b_i для каждого продукта сгорания по таблице 4 приложений (используем молярные теплоемкости веществ) и рассчитываем значения $a' = a + \frac{bT_{ст}}{2}$ и $b' = \frac{b}{2}$:

$$a' = a + \frac{bT_{ст}}{2} \text{ и } b' = \frac{b}{2}:$$

Вещество	a_i	a'_i	b_i	b'_i
воздух	28,62	29,23	$4,08 \cdot 10^{-3}$	$2,04 \cdot 10^{-3}$
N_2	27,87	28,54	$4,27 \cdot 10^{-3}$	$2,135 \cdot 10^{-3}$
CO_2	44,14	45,49	$9,04 \cdot 10^{-3}$	$4,52 \cdot 10^{-3}$
H_2O (газ)	30,00	31,59	$10,71 \cdot 10^{-3}$	$5,355 \cdot 10^{-3}$

4. Рассчитываем константы $a_{см}$ и $b_{см}$:

Вещество	$a'_i n_{пг_i}$	$b'_i n_{пг_i}$
воздух	$29,23 \cdot 5,0$	$2,030 \cdot 10^{-3} \cdot 5,0$
N_2	$28,54 \cdot 5,64$	$2,135 \cdot 10^{-3} \cdot 5,64$
CO_2	$45,49 \cdot 1$	$4,520 \cdot 10^{-3} \cdot 1$
H_2O (г)	$31,59 \cdot 2$	$5,355 \cdot 10^{-3} \cdot 2$
смесь продуктов горения	$a_{см} = 415,8$	$b_{см} = 37,5 \cdot 10^{-3}$

5. Рассчитываем температуру горения:

$$t_{\text{гор}} = \frac{-415,8 + \sqrt{415,8^2 + 4 \cdot 37,5 \cdot 10^{-3} \cdot 638,5 \cdot 10^3}}{2 \cdot 37,5 \cdot 10^{-3}} = 1367^\circ\text{C}.$$

Вывод: адиабатическая температура горения пара мета-нола при данных условиях равняется 1367°C.

Методика расчета температуры горения с использованием теплоемкости продуктов горения для сложных веществ

1. Рассчитать удельный теоретический объем воздуха $v_{\text{в}}^{\circ}$, необходимый для сгорания 1 м³ газовой смеси или 1 кг горючего материала, соответственно по формуле (1.32) или (1.34).

2. Определить удельные теоретические объемы продуктов сгорания с использованием табл. 1.5 или табл. 1.6 в зависимости от агрегатного состояния горючего вещества.

3. Рассчитать удельный действительный объем каждого продукта сгорания с учетом избытка воздуха.

4. Определить по справочным данным или рассчитать низшую массовую теплоту сгорания вещества по уравнению (2.19) или объемную теплоту сгорания газовой смеси по формуле (2.17).

5. Определить константы уравнения (2.38) a_i и b_i для каждого продукта сгорания по таблице 4 приложений (использовать объемные теплоемкости газов).

6. Рассчитать константы $a_{см}$ и $b_{см}$ для смеси продуктов горения по формулам (2.33), (2.34).

7. Рассчитать температуру горения по формуле (2.35).

Пример решения задачи

Рассчитать температуру горения дизельного топлива такого состава: С – 83 %, Н – 15 %, S – 1 %, N – 1 %. Горение проходило при нормальных условиях с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,4$. Принять, что во время горения потери тепла в окружающую среду составляли 25 % от теплоты сгорания и образовывались лишь продукты полного сгорания.

Решение

1. Рассчитываем удельный теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания 1 кг дизельного топлива, по формуле (1.34):

$$v_v^o = \frac{4,76 \cdot 22,4}{4 \cdot 100} \left(\frac{83}{3} + 15 - \frac{0-1}{8} \right) = 11,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

2. Определяем удельные объемы продуктов горения с учетом состава вещества и коэффициентов табл. 1.6. Для удобства составляем таблицу:

Элемент	Массовая доля	Объем продукта сгорания, м ³ ·кг ⁻¹			
		CO ₂	H ₂ O	SO ₂	N ₂
C	0,83	0,83·1,87			0,83·7,0
H	0,15		0,15·11,2		0,15·21,1
S	0,01			0,01·0,7	0,01·2,63
N	0,01				0,01·0,8
Всего	1,00	1,55	1,68	0,007	9,0

3. Рассчитываем удельный объем каждого продукта сгорания с учетом избытка воздуха:

$$\begin{aligned} v_{\text{CO}_2} &= 1,55 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}; & v_{\text{N}_2} &= 9,0 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}; \\ v_{\text{H}_2\text{O}} &= 1,68 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}; & v_{\text{SO}_2} &= 0,007 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}; \\ \Delta v_{\text{в}} &= (1,4 - 1) \cdot 11,4 = 4,56 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}. \end{aligned}$$

4. Рассчитываем низшую массовую теплоту сгорания дизельного топлива заданного состава:

$$\begin{aligned} Q'_{\text{н}} &= 339,4 \cdot 83 + 1256,8 \cdot 15 - 108,9(1 - 1) - \\ &- 25,1 \cdot 9 \cdot 15 = 43633,7 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}. \end{aligned}$$

На разогрев продуктов сгорания было израсходовано 75 % низшей массовой теплоты сгорания:

$$Q'_{\text{пг}} = 0,75 \cdot 43633,7 = 32725,3 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

5. Определяем константы уравнения (2.39) a_i и b_i для каждого продукта сгорания по таблице 4 приложений (используем объемные теплоемкости газов) и рассчитываем

$$\text{значения } a' = a + \frac{bT_{\text{ст}}}{2} \text{ и } b' = \frac{b}{2} :$$

Вещество	a_i	a'_i	b_i	b'_i
воздух	1172,95	1197,86	$167,21 \cdot 10^{-3}$	$83,6 \cdot 10^{-3}$
N_2	1142,21	1168,28	$175,00 \cdot 10^{-3}$	$87,5 \cdot 10^{-3}$
CO_2	1809,02	1864,22	$370,49 \cdot 10^{-3}$	$185,25 \cdot 10^{-3}$
H_2O (газ)	1229,51	1294,91	$438,93 \cdot 10^{-3}$	$219,47 \cdot 10^{-3}$
SO_2	1743,85	1820,49	$514,34 \cdot 10^{-3}$	$257,17 \cdot 10^{-3}$

6. Рассчитываем константы $a_{сум}$ и $b_{сум}$.

Вещество	$a_i \cdot v_{пр_i}$	$b_i \cdot v_{пр_i}$
воздух	$1197,86 \cdot 4,56$	$83,6 \cdot 10^{-3} \cdot 4,56$
N_2	$1168,28 \cdot 9,0$	$87,5 \cdot 10^{-3} \cdot 9,0$
CO_2	$1864,22 \cdot 1,55$	$185,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,55$
H_2O (г)	$1294,91 \cdot 1,68$	$219,47 \cdot 10^{-3} \cdot 1,68$
SO_2	$1820,49 \cdot 0,007$	$257,17 \cdot 10^{-3} \cdot 0,007$
смесь продуктов горения	$a_{сум} = 21054,5$	$b_{сум} = 1826,4 \cdot 10^{-3}$

7. Рассчитываем температуру горения по формуле (2.35):

$$t_{гор} = \frac{-21054,5 + \sqrt{21054,5^2 + 4 \cdot 1826,4 \cdot 327253 \cdot 10^3}}{2 \cdot 1826,4 \cdot 10^{-3}} = 1388 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Вывод: температура горения дизельного топлива при данных условиях равняется 1388 °С.

§ 2.3. Расчет температуры диффузионного горения в ограниченном пространстве

Диффузионное горение веществ и материалов в ограниченном пространстве сопровождается разбавлением воздуха продуктами горения. Известно, что пламенное диффузионное горение прекращается при условии снижения концентрации кислорода в газовой смеси (смеси воздуха и продуктов горения) до 14 - 16 %.

Расчет коэффициента избытка воздуха во время диффузионного горения в ограниченном пространстве осуществляют по формуле:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{\text{O}_2}}, \quad (2.40)$$

где φ_{O_2} – конечная объемная концентрация кислорода в газовой смеси в помещении, %.

Наличие избытка воздуха во время диффузионного горения в ограниченном пространстве определяет полноту сгорания горючего вещества и степень нагрева продуктов горения. Расчет температуры диффузионного горения в пространстве также можно проводить с использованием

зависимости теплоемкости дымовых газов от температуры или методом линейной интерполяции с использованием энтальпии продуктов сгорания. Для этого сначала необходимо определить фактический коэффициент избытка воздуха по содержанию кислорода в продуктах горения по формуле (2.39), а потом повторить расчет по приведенным ранее методикам.

Пример решения задачи

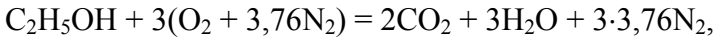
Рассчитать температуру диффузионного пламени этанола при условии возникновения горения аварийного разлива горючего жидкости в рабочем цехе ликероводочного завода, если конечная концентрация кислорода в помещении равняла 13 %, а потери тепла из зоны горения составляли 20 % от общего количества тепла, которое выделялось. Начальные условия считать стандартными. Принять, что образовывались только продукты полного сгорания.

Решение

1. Рассчитываем коэффициент избытка воздуха во время диффузионного горения в помещении цеха:

$$\alpha = \frac{21}{21-13} = 2,6.$$

2. Определяем состав и удельное количество молей продуктов горения этанола с учетом избытка воздуха:



$$\beta = 3;$$

$$n_{CO_2} = 2 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad n_{H_2O} = 3 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$n_{N_2} = 3 \cdot 3,76 = 11,28 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\Delta n_v = (2,6 - 1) \cdot 3 \cdot 4,76 = 22,8 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Рассчитываем низшую стандартную теплоту сгорания этанола по закону Гесса (2.14) с учетом, что теплота образования этанола равняется минус 234,9 кДж·моль⁻¹:

$$Q_H = | 2 \cdot (-393,5) + 3 \cdot (-241,8) - (-234,9) | = 1278,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

4. Определяем константы уравнения $c_{p_i} = a_i + b_i \cdot t$ для каждого продукта сгорания по таблице 4 приложений (используем молярные теплоемкости веществ) и рассчитываем значения $a' = a + \frac{bT_{ст}}{2}$ и $b' = \frac{b}{2}$:

$$a' = a + \frac{bT_{ст}}{2} \text{ и } b' = \frac{b}{2} :$$

Вещество	a_i	a'_i	b_i	b'_i
воздух	28,62	29,23	$4,08 \cdot 10^{-3}$	$2,04 \cdot 10^{-3}$
N_2	27,87	28,54	$4,27 \cdot 10^{-3}$	$2,135 \cdot 10^{-3}$
CO_2	44,14	45,49	$9,04 \cdot 10^{-3}$	$4,52 \cdot 10^{-3}$
H_2O (газ)	30,00	31,59	$10,71 \cdot 10^{-3}$	$5,355 \cdot 10^{-3}$

5. Рассчитываем константы $a_{см}$ и $b_{см}$:

Вещество	$a'_i n_{пг_i}$	$b'_i n_{пг_i}$
воздух	$29,23 \cdot 22,8$	$2,030 \cdot 10^{-3} \cdot 22,8$
N_2	$28,54 \cdot 11,28$	$2,135 \cdot 10^{-3} \cdot 11,28$
CO_2	$45,49 \cdot 2$	$4,520 \cdot 10^{-3} \cdot 2$
H_2O (г)	$31,59 \cdot 3$	$5,355 \cdot 10^{-3} \cdot 3$
смесь продуктов горения	$a_{см} = 1174,1$	$b_{см} = 95,5 \cdot 10^{-3}$

6. Рассчитываем температуру горения по формуле (2.35) с учетом потерь тепла.

По условию задачи $Q_{пот} = 0,2Q_H$, поэтому, на нагрев продуктов горения расходуется:

$$Q_{пг} = Q_H - Q_{пот} = Q_H \cdot (1 - 0,2) = 0,8Q_H;$$

$$t_{гор} = \frac{-1174 + \sqrt{1174^2 + 4 \cdot 0,095 \cdot 0,8 \cdot 1278,2 \cdot 10^3}}{2 \cdot 0,095} = 1007^\circ C.$$

Вывод: температура горения этанола при данных условиях равняется $1007^\circ C$.

§ 3. Расчет температуры взрыва паровоздушных смесей

Кинетическое горение газовой или паровой смеси протекает с такой большой скоростью, что горючая смесь успевает сгореть еще до теплового расширения продуктов реакции. Поэтому можно считать, что процесс горения во время взрыва протекает при постоянном объеме. Вследствие этого продукты горения нагреваются в две стадии: в результате тепловыделения химической реакции и в результате адиабатического сжатия.

Согласно первому закону термодинамики, тепло, которое выделилось при этом в системе, составляет: $dQ = dU + PdV = dH - VdP$, или при постоянном объеме: $dU = dH - VdP$. С учетом (2.7), (2.8) и уравнения состояния идеального газа перепишем это выражение:

$$-Q_v = -Q_p - \Delta nRT_0 \quad \text{или} \quad Q_{\text{взр}} = Q_n + \Delta nRT_0, \quad (2.41)$$

где Q_p – теплота реакции при постоянном давлении;

Q_v – теплота реакции при постоянном объеме;

$Q_{\text{взр}}$ – теплота, которая выделяется во время взрыва;

Q_n – низшая теплота сгорания горючего вещества;

$R = 8,3 \cdot 10^{-3}$ кДж·моль⁻¹·К⁻¹ – универсальная газовая постоянная;

T_0 – начальная температура исходной смеси, К;

Δn – разность между количеством молей продуктов горения $n_{пг}$ и исходной горючего смеси $n_{гс}$.

Считаем, что вся внутренняя энергия, которая выделяется во время взрыва (энергия взрыва $Q_{взр}$), тратится на повышение внутренней энергии продуктов горения, т.е.:

$$Q_{взр} = \sum_i \Delta U_{пг_i}^{T_{взр}} n_{пг_i}, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (2.42)$$

Давление взрыва можно рассчитать по формуле:

$$P_{взр} = \frac{P_0 n_{пг} T_{взр}}{n_{гс} T_0}, \text{ кПа}, \quad (2.43)$$

где $P_{взр}$ – давление продуктов горения при взрыве, кПа;

P_0 – начальное давление горючей смеси, кПа;

$T_{взр}$ – температура взрыва горючей смеси, К;

T_0 – начальная температура исходной смеси, К;

$n_{пг}$ – количество молей продуктов горения,
моль·моль⁻¹;

$n_{гс}$ – количество молей исходной смеси, моль·моль⁻¹.

§ 3.1. Расчет максимальной температуры и давления взрыва индивидуального вещества

Расчет максимальной температуры и давления взрыва проводят по уравнению реакции горения с использованием значений внутренней энергии системы. При этом принимают следующие предположения:

- происходит адиабатическое сгорание смеси при постоянном объеме;
- горение протекает при стехиометрическом соотношении горючего вещества и воздуха ($\alpha = 1$);
- сгорание вещества происходит без температурной диссоциации продуктов горения.

Методика определения максимальной температуры и давления взрыва

1. Составить уравнение реакции горения.
2. Рассчитать удельное теоретическое количество молей продуктов горения $n_{\text{пр}}^{\circ}$.
3. Рассчитать теоретическое количество молей исходной горючей смеси:

$$n_{гс} = 1 + \beta \cdot 4,76, \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (2.44)$$

4. Определить низшую стандартную теплоту сгорания вещества по справочным данным или по закону Гесса (2.14).

5. Рассчитать энергию взрыва смеси по формуле (2.40).

6. Определить среднюю энергию продуктов взрыва:

$$Q_{vср} = \frac{Q_{взр}}{n_{пг}^0}, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (2.45)$$

7. Ориентируясь на молярную внутреннюю энергию азота (таблица **Ошибка! Источник ссылки не найден.** приложений), определить температуру взрыва в первом приближении T_1 .

8. Рассчитать энергию продуктов взрыва при температуре T_1 с использованием данных внутренней энергии продуктов горения (таблица **Ошибка! Источник ссылки не найден.** приложений) по формуле:

$$Q_{vпг}^{T_1} = \sum_i U_{пгi}^{T_1} \cdot n_{пгi}, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (2.46)$$

9. Определить температуру взрыва во втором приближении: $T_2 < T_1$, если $Q_{v_{\text{ПГ}}}^{T_1} > Q_{\text{взр}}$; или $T_2 > T_1$, если $Q_{v_{\text{ПГ}}}^{T_1} < Q_{\text{взр}}$.

10. Рассчитать энергию продуктов взрыва при температуре T_2 исходя из внутренней энергии продуктов горения:

$$Q_{v_{\text{ПГ}}}^{T_2} = \sum_i U_{\text{ПГ}_i}^{T_2} \cdot n_{\text{ПГ}_i}, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (2.47)$$

11. Рассчитать температуру взрыва методом линейной интерполяции:

$$T_{\text{взр}} = T_1 + \frac{(T_2 - T_1) \cdot (Q_{\text{взр}} - Q_{v_{\text{ПГ}}}^{T_1})}{(Q_{v_{\text{ПГ}}}^{T_2} - Q_{v_{\text{ПГ}}}^{T_1})}, \text{ К}. \quad (2.48)$$

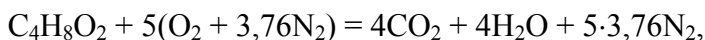
12. Рассчитать максимальное давление взрыва по формуле (2.42).

Пример решения задачи

Определить максимальную температуру и давление взрыва стехиометрической паровоздушной смеси этилацетата $C_4H_8O_2$ ($\Delta H_f^\circ = -442,9$ кДж·моль⁻¹), если начальная температура паровоздушной смеси – 25 °С, а давление – 110 кПа.

Решение

1. Составляем уравнение реакции горения этилацетата, определяем стехиометрический коэффициент β :



$$\beta = 5.$$

2. Рассчитываем удельное теоретическое количество молей продуктов горения:

$$n_{\text{пр}}^\circ = 4 + 4 + 5 \cdot 3,76 = 26,8 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Рассчитываем теоретическое количество молей исходной смеси по формуле (2.43):

$$n_{\text{гс}}^\circ = 1 + 5 \cdot 4,76 = 24,8 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

4. Рассчитываем низшую молярную теплоту сгорания:

$$Q_H = |4 \cdot (-393,5) + 4 \cdot (-241,8) - (-442,9)| = 2100 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

5. Рассчитываем энергию взрыва горючей смеси:

$$\Delta n = 26,8 - 24,8 = 2 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1},$$

$$Q_{\text{взр}} = 2100 + 2 \cdot 8,314 \cdot 10^{-3} \cdot 298 = 2105 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

6. Рассчитываем среднюю энергию продуктов взрыва, (2.44):

$$Q_{\text{вср}} = \frac{2105}{26,8} = 78,52 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

7. Ориентируясь на молярную внутреннюю энергию азота (табл. **Ошибка! Источник ссылки не найден.** приложений), определяем температуру взрыва в первом приближении: $T_1 = 3000 \text{ К}$.

8. Определяем внутреннюю энергию продуктов горения при температуре T_1 и рассчитываем энергию продуктов взрыва по формуле (2.45):

$$U_{\text{CO}_2}^{T_1} = 137,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad U_{\text{N}_2}^{T_1} = 76,9 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$U_{\text{H}_2\text{O}}^{T_1} = 113,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$Q_{\text{впг}}^{T_1} = 137,7 \cdot 4 + 113,2 \cdot 4 + 76,9 \cdot 5 \cdot 3,76 = 24497 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

9. Определяем температуру взрыва во втором приближении. Поскольку $Q_{\text{впг}}^{T_1} > Q_{\text{взр}}$, температуру во втором приближении выбираем меньше, чем первое значение: $T_2 = 2600 \text{ К}$.

10. Рассчитываем внутреннюю энергию продуктов взрыва при температуре T_2 по формуле (2.46):

$$U_{\text{CO}_2}^{T_2} = 116,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad U_{\text{N}_2}^{T_2} = 65,4 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$U_{\text{H}_2\text{O}}^{T_2} = 93,95 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$Q_{\text{впг}}^{T_2} = 116,2 \cdot 4 + 93,95 \cdot 4 + 65,4 \cdot 5 \cdot 3,76 = 2071 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

11. Рассчитываем температуру взрыва методом линейной интерполяции по формуле (2.47):

$$T_{\text{взр}} = 3000 + \frac{(2600 - 3000)(2104,5 - 2449,7)}{(2071 - 2449,7)} = 2635 \text{ К.}$$

12. Рассчитываем максимальное давление взрыва стехиометрической паровоздушной смеси этилацетата при данных условиях по формуле (2.42):

$$P_{\text{max}} = \frac{110 \cdot 26,8 \cdot 2635}{24,8 \cdot 298} = 955 \text{ кПа.}$$

Вывод: при взрыве стехиометрической паровоздушной смеси этилацетата при данных условиях температура взрыва составит 2635 К, а давление продуктов горения – 955 кПа.

§ 3.2. Расчет температуры взрыва индивидуального вещества при избытке воздуха

При аварийном нарушении технологического процесса (выход горючих газов в помещение или разлив горючей жидкости с ее испарением) концентрация горючего вещества в производственном помещении во времени возрастает, а содержание воздуха при этом уменьшается. При достижении концентрацией горючего вещества определенного критического значения (нижнего концентрационного предела φ_n) образуется среда, которая может в случае появления источника зажигания гореть в кинетическом режиме, т.е. может произойти взрыв газо- или паровоздушной смеси. Для кинетического горения существуют критические значения коэффициента избытка воздуха α_{\min} и α_{\max} , которые отвечают смесям с критическим содержанием кислорода и горючего вещества соответственно.

Смесь, которая образуется во время аварийного поступления горючего вещества в помещение и соответствует минимальному взрывоопасному содержанию горючего вещества φ_n , будет иметь избыток воздуха. При этом коэффициент избытка воздуха можно определить по уравнению:

$$\alpha_{\max} = \frac{100 - \varphi_{\text{H}}}{\varphi_{\text{H}} \cdot v_{\text{B}}^{\circ}} \quad \text{или} \quad \alpha_{\max} = \frac{100 - \varphi_{\text{H}}}{\varphi_{\text{H}} \cdot n_{\text{B}}^{\circ}}, \quad (2.49)$$

где φ_{H} – нижний концентрационный предел распространения пламени для воздушной смеси горючего вещества, %;

$v_{\text{B}}^{\circ}, n_{\text{B}}^{\circ}$ – удельный теоретический объем или количество молей воздуха соответственно.

Тогда действительное количество молей воздуха:

$$n_{\text{B}} = \alpha \cdot n_{\text{B}}^{\circ} = \frac{100 - \varphi_{\text{H}}}{\varphi_{\text{H}}}. \quad (2.50)$$

Избыток воздуха, который переходит в состав продуктов горения, можно определить по формуле:

$$\Delta n_{\text{B}} = \alpha \cdot n_{\text{B}}^{\circ} - n_{\text{B}}^{\circ} = \frac{100 - \varphi_{\text{H}}}{\varphi_{\text{H}}} - n_{\text{B}}^{\circ}. \quad (2.51)$$

Разность между действительным количеством молей продуктов горения и действительным количеством молей исходной смеси, как и для стехиометрической смеси, составляет:

$$\begin{aligned} \Delta n &= n_{\text{пг}} - n_{\text{гс}} = n_{\text{пг}}^{\circ} + \Delta n_{\text{в}} - (1 + \alpha n_{\text{в}}^{\circ}) = \\ &= n_{\text{пг}}^{\circ} - (n_{\text{в}}^{\circ} + 1) \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \end{aligned} \quad (2.52)$$

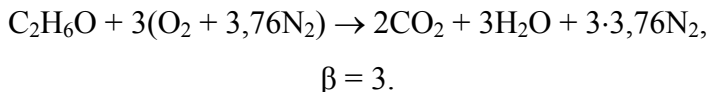
Расчет температуры и давления взрыва индивидуального вещества при избытке воздуха можно провести по предыдущей методике с учетом, что исходная горючая смесь и продукты горения содержат избыток воздуха, который можно рассчитать по формуле (2.47). Для этого необходимо сначала определить по справочнику [18] или с помощью расчетов нижний концентрационный предел распространения пламени горючего вещества $\varphi_{\text{н}}$.

Пример решения задачи

Рассчитать температуру взрыва, который произошел при сгорании паровоздушного облака, образовавшегося в цехе ликероводочного завода вследствие разрыва технологического трубопровода и испарения этанола. Считать, что взрыв произошел при стандартных начальных условиях в момент достижения концентрацией пара этанола нижнего концентрационного предела распространения пламени. Во время горения образовывались только продукты полного сгорания, их диссоциация не происходила.

Решение

1. Составляем уравнение реакции горения этанола в воздухе:



2. Определяем удельное теоретическое количество молей воздуха:

$$n_{\text{в}}^0 = 4,76 \cdot \beta = 4,76 \cdot 3 = 14,3 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Определяем удельное теоретическое количество молей продуктов горения:

$$n_{\text{пт}}^0 = 2 + 3 + 3,76 \cdot 3 = 16,3 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

4. Определяем разность между количеством молей продуктов горения и количеством молей исходной смеси:

$$\Delta n = 16,3 - (14,3 + 1) = 1 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

5. Определяем по справочнику [7] нижний концентрационный предел распространения пламени этанола: φ_n
 $= 3,6 \%$.

6. Рассчитываем коэффициент избытка воздуха, соответствующий наименьшему взрывоопасному содержанию горючего вещества в смеси с воздухом φ_n , по формуле (2.45):

$$\alpha = \frac{100 - 3,6}{14,28 \cdot 3,6} = 1,9.$$

7. Рассчитываем количество молей исходной горючей смеси с учетом избытка воздуха:

$$n_{ГС} = 1 + 1,9 \cdot 14,3 = 28,2 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

8. Рассчитываем действительное количество молей продуктов горения с учетом избытка воздуха по формуле (1.17):

$$n_{ПГ} = 16,3 + (1,9 - 1) \cdot 14,3 = 29,2 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

9. Рассчитываем энергию взрыва паровоздушной смеси этанола по формуле (2.40). Определяем по справочнику [7] стандартную теплоту сгорания этанола: $Q_n = 1408 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

$$Q_{\text{взр}} = 1408 + 1 \cdot 8,314 \cdot 10^{-3} \cdot 298 = 1410,5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

10. Рассчитываем среднюю энергию продуктов взрыва по формуле (2.45):

$$Q_{\text{вср}} = \frac{1410,5}{29,2} = 48,3, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

11. Ориентируясь на молярную внутреннюю энергию азота по табл. **Ошибка! Источник ссылки не найден.** приложений, определяем температуру взрыва в первом приближении: $T_1 = 2000 \text{ К}$.

12. Определяем внутреннюю энергию продуктов горения при температуре T_1 и рассчитываем энергию продуктов взрыва по формуле (2.45) с учетом избытка воздуха:

$$U_{\text{CO}_2}^{T_1} = 84,5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad U_{\text{N}_2}^{T_1} = 48,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$U_{\text{H}_2\text{O}}^{T_1} = 66,8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad U_{\text{B}}^{T_1} = 49,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{вср}}^{T_1} &= 2 \cdot 84,5 + 3 \cdot 66,8 + 3 \cdot 3,76 \cdot 48,6 + (1,9 - 1) \cdot 14,3 \cdot 49,2 = \\ &= 1550,9 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \end{aligned}$$

13. Определяем температуру взрыва во втором приближении T_2 . Поскольку $Q_{\text{vпг}}^{T_1} > Q_{\text{взр}}$, температуру во втором приближении выбираем меньше, чем первое значение: $T_2 = 1800 \text{ K}$.

14. Рассчитываем внутреннюю энергию продуктов взрыва при температуре T_2 по формуле (2.46):

$$U_{\text{CO}_2}^{T_2} = 74,1 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad U_{\text{N}_2}^{T_2} = 43,0 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$U_{\text{H}_2\text{O}}^{T_2} = 58,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad U_{\text{B}}^{T_2} = 43,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{vпг}}^{T_2} &= 2 \cdot 74,1 + 3 \cdot 58,2 + 3 \cdot 3,76 \cdot 43,0 + (1,9 - 1) \cdot 14,3 \cdot 43,6 = \\ &= 1368,1 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \end{aligned}$$

15. Рассчитываем температуру взрыва по формуле (2.47):

$$T_{\text{взр}} = 2000 + \frac{(1800 - 2000)(1410,5 - 1550,9)}{1368,1 - 1550,9} = 1846 \text{ K}.$$

16. Рассчитываем давление взрыва по формуле (2.42):

$$P_{\text{взр}} = \frac{101,3 \cdot 29,2 \cdot 1846}{28,2 \cdot 298} = 649,8 \text{ кПа.}$$

Вывод: во время взрыва паровоздушной смеси этанола, который произошел после аварийного разлива в цехе ликеро-водочного завода, температура взрыва достигнет 1846 К, а давление взрыва – 649,8 кПа.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Для веществ, приведенных в таблице, определить:
 - а) стандартную теплоту образования, низшую и высшую молярную теплоту сгорания вещества;
 - б) высшую массовую и объемную теплоты сгорания;
 - в) адиабатическую температуру горения с использованием энтальпии продуктов горения;
 - г) адиабатическую температуру горения с использованием теплоемкости продуктов горения.
2. Для смеси газов, состав которой приведен в таблице, определить:
 - а) низшую объемную теплоту сгорания;
 - б) адиабатическую температуру горения с использованием энтальпии продуктов горения;
 - в) адиабатическую температуру горения с использованием теплоемкости продуктов горения.
3. Для веществ, состав которых приведен в таблице, определить:

№	Вещество	α	№	Вещество	α
1.	метан CH_4	1,8	21.	дихлорэтан $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$	1,1
2.	метанол CH_4O	1,2	22.	толуол C_7H_8	1,3
3.	циклопентан C_5H_{10}	1,5	23.	диметилкетон $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	1,4
4.	бензол C_6H_6	1,6	24.	фенол $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$	1,2
5.	пропилен C_3H_6	1,2	25.	этилацетат $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	1,3
6.	гептанол $\text{C}_7\text{H}_{16}\text{O}$	1,3	26.	циклогексанол $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$	1,8
7.	пентан C_5H_{12}	1,5	27.	глицерин $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	1,3
8.	сульфид углероду CS_2	1,7	28.	бутанол $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	1,9
9.	нитробензол $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	1,1	29.	бензиловый спирт $\text{C}_7\text{H}_8\text{O}$	2,0
10.	октан C_8H_{18}	1,6	30.	пропанол $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	1,2
11.	анилин $\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	1,3	31.	нитротолуол $\text{C}_7\text{H}_7\text{NO}_2$	1,7
12.	диэтиловый эфир $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	2,0	32.	фталевая кислота $\text{C}_8\text{H}_4\text{O}_3$	1,5
13.	хлоргексан $\text{C}_6\text{H}_{13}\text{Cl}$	2,1	33.	этанол $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	1,4
14.	диметиламин $\text{C}_2\text{H}_7\text{N}$	1,8	34.	амилацетат $\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}_2$	2,2
15.	уротропин $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$	2,2	35.	хлорбензол $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	2,6
16.	ацетилен C_2H_2	2,5	36.	хлорбутан $\text{C}_4\text{H}_9\text{Cl}$	1,9
17.	диэтилкетон $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}$	1,9	37.	бутан C_4H_{10}	2,4
18.	диэтиловый эфир $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	2,7	38.	пропан C_3H_8	1,8
19.	динитрофенол $\text{C}_6\text{H}_4\text{O}_5\text{N}_2$	1,8	39.	гексан C_6H_{14}	2,7
20.	диметилфосфат $(\text{CH}_3)_2\text{HPO}_4$	1,4	40.	дихлордиэтилсульфид $(\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl})_2\text{S}$	1,4

Глава 2. Энергетический баланс процесса горения

№	Смесь газов	α	Содержание газов, об. %										
			H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₈	CO ₂	N ₂
<i>Газы</i>													
1	водяной	1,1	45	35	14	–	–	–	–	–	–	–	6
2	водяной	1,2	50	40	1	–	–	–	–	–	–	4	5
3	полуводяной	1,3	10	22	3	–	–	–	–	–	–	9	56
4	оксिवодяной	1,5	33	54	1	–	–	–	–	–	–	10	2
5	доменный	1,4	2	28	1	–	–	–	–	–	–	19	50
6	доменный	1,7	3	29	0,5	–	–	–	–	–	–	16,5	51
7	генераторный	1,6	21	39	40	–	–	–	–	–	–	–	–
8	коксовый	2,0	57	8	23	3	3	–	–	–	–	3	3
9	коксовый	1,8	53	5	30	2	4	–	–	–	–	2	4
10	бытовой	2,1	35	20	30	–	–	–	–	–	–	8	7
11	природный	2,2	–	–	65	15	–	–	13	–	–	–	7
12	подземной газификации	1,9	13	15	2	–	–	–	–	–	–	10	60
<i>Газообразные продукты пиролиза жидкостей</i>													
13	газовый бензин	1,1	16	–	28	8	24	–	4	6	14	–	–
14	лигроин	1,2	15	–	25	9	26	7	3	–	10	3	2
15	керосин	1,3	18	–	32	5	26	–	5	–	3	6	5
16	газовый конденсат	1,4	25	–	24	7	16	–	8	–	7	10	3
17	сланцева смола	1,5	21	–	33	8	17	8	–	1	1	10	1
18	крекинг полимеров	1,6	18	–	31	8	23	–	3	4	3	6	4
19	сырая нефть	1,7	17	–	24	9	26	3	4	6	4	6	1
20	очищенная нефть	1,8	14	–	31	20	–	–	15	20	–	–	–

а) массу горючего вещества, которую необходимо сжечь для нагрева заданной массы воды (интервал нагрева воды и доля тепла, теряющаяся в процессе нагрева, приведены в таблице; теплоемкость воды $4,18 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$);

б) массу горючего вещества, которую необходимо сжечь для испарения заданной массы воды при условии, что 100 % тепла, выделившегося при полном сгорании горючего вещества, израсходовалось на испарение заданного количества воды (теплота испарения воды $2260 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$);

в) пожарную нагрузку в помещении площадью 150 м^2 , если сгорает три типа горючих материалов (задает преподаватель) массой по 20 кг каждый;

г) адиабатическую температуру горения вещества с использованием энтальпии продуктов горения, если горение происходило при известном коэффициенте избытка воздуха без потерь тепла;

д) температуру горения вещества с использованием теплоемкости продуктов горения, если горение происходило при известном коэффициенте избытка воздуха (α) с учетом потерь тепла.

Глава 2. Энергетический баланс процесса горения

№	Вещество	Состав вещества, % мас.						Теплопотери, $Q_{\text{н}}$, %	α	m H ₂ O, кг	Интервал нагрева, °С
		С	Н	О	S (N)	W	A				
1.	нефть	84	14	–	1	1	–	10	1,8	30	5 – 80
2.	–//–	85	13	1	–	1	–	8	1,7	40	10– 100
3.	керосин	85	14	1	–	–	–	7	1,6	110	20 – 80
4.	бензин	83	12	3	2	–	–	6	1,5	90	0 – 25
5.	–//–	83	15	1		1		9	1,9	20	10 – 70
6.	диз. топ- ливо	86	12	1	(1)	–	–	5	1,4	30	15 – 60
7.	мазут	83	11	1	(4)	1	–	24	1,3	50	15 – 90
8.	древеси- на	45	6	41	(2)	4	2	13	1,5	40	5 – 70
9.	–//–	42	6	38	(4)	7	3	5	1,3	30	10– 100
10.	–//–	45	7	40	–	7	1	4	1,2	60	20– 100
11.	–//–	46	6	41	–	5	2	5	1	70	15 – 95
12.	торф	46	5	40	(4)	4	1	7	1,6	30	5 – 100
13.	–//–	54	5	30	1	7	3	5	1,2	40	10 – 85
14.	–//–	56	4	36	1	1	2	16	1,3	50	5 – 95
15.	–//–	57	6	34	1	1	1	4	1,7	30	10 – 80
16.	уголь	78	7	10	2	1	2	10	1,4	40	5 – 100
17.	–//–	80	5	10	3	1	1	7	1,8	50	10 – 95
18.	–//–	77	5	11	3	1	3	10	1,5	40	0 – 90
19.	–//–	83	5	8	1	1	2	5	1,4	30	5 – 95
20.	–//–	86	5	6	1	2	–	6	1,3	50	0 – 100
21.	кокс	93	4	2	1	–	–	17	1,2	30	10 – 95
22.	–//–	91	6	2	1	–	–	4	1,1	15	5 – 95
23.	–//–	96	1	–	1	–	2	25	2,0	60	5 – 95
24.	–//–	98	–	–	1	–	1	10	1,9	40	10 – 95

Глава 2. Энергетический баланс процесса горения

25.	- // -	92	3	1	-	-	4	9	1,6	50	5 – 95
26.	- // -	85	13	1	-	-	1	7	1,5	40	8 – 100
27.	- // -	84	14	1	-	-	1	10	1,4	50	5 – 100
28.	пластик	44	6	49	-	-	1	10	1,3	40	10 – 90
29.	- // -	45	5	49	-	-	1	10	1,2	30	10–100
30.	- // -	64	6	30	-	-	-	10	1,1	20	5 – 95
31.	картон	50	20	15	-	5	10	8	1,8	100	-20– 10
32.	хлопок	46	25	15	(6)	8	-	9	1,7	5	10 – 40
33.	каучук	85	13	1	1	-	-	7	1,5	10	10 – 70
34.	- // -	78	15	2	5	-			1,4	7	25 – 45
35.	- // -	81	16	1	1	-	1		1,1	15	30 – 85

4. Для веществ, приведенных в таблице, определить:

а) количество тепла, выделяющегося при полном сгорании при стандартных условиях указанной массы горючего вещества; какая масса воды может быть нагрета при этом до температуры кипения (начальная температура воды 25 °С, теплоемкость воды $c_p = 4,18 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$);

б) температуру диффузионного горения паров горючей жидкости при аварийном разливе в производственном помещении, если конечное содержание кислорода в продуктах горения приведено в таблице.

№	Вещество	Суммарная формула	Масса воды, кг	Содержание кислорода в продуктах горения, %
1.	акриловая кислота	$C_3H_4O_2$	7	13
2.	амилацетат	$C_7H_{14}O_2$	3	16
3.	амиловый спирт	$C_5H_{12}O$	5	11,5
4.	анилин	C_6H_7N	10	15
5.	ацетон	C_3H_6O	12	18
6.	ацетанилид	C_8H_9ON	25	15
7.	ацетальдегид	C_2H_4O	16	14
8.	бензол	C_6H_6	4	13
9.	бутилацетат	$C_6H_{12}O_2$	8	12
10.	бутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	15	14
11.	тиодигликоль	$C_4H_{10}O_2S$	54	15
12.	циклопентан	C_5H_{10}	26	18
13.	метанол	CH_4O	47	12
14.	ксилол	C_8H_{10}	45	17
15.	бензин Б-70	$C_{7,267}H_{14,796}$	50	14
16.	бензин А-72 "З"	$C_{6,991}H_{13,108}$	40	16
17.	бензин А-93 "Л"	$C_{7,024}H_{13,706}$	30	19
18.	бензин А-93 "З"	$C_{6,911}H_{12,168}$	20	17
19.	дизельное топливо "З"	$C_{12,343}H_{23,889}$	10	15
20.	дизельное топливо "Л"	$C_{14,511}H_{29,120}$	5	16

№	Вещество	Суммарная формула	Масса воды, кг	Содержание кислорода в продуктах горения, %
21.	уайт-спирит	$C_{10,5}H_{21,0}$	55	18
22.	керосин ГО – 20	$C_{13,595}H_{28,860}$	15	19
23.	керосин ГО – 22	$C_{10,914}H_{21,832}$	25	13
24.	керосин ГО – 25	$C_{11,054}H_{21,752}$	35	14
25.	масло трансформаторное	$C_{21,74}H_{42,28}S_{0,04}$	65	16
26.	масло АМТ–300	$C_{22,25}H_{33,48}S_{0,34}N_{0,07}$	75	17
27.	масло АМТ–300Т	$C_{19,04}H_{24,58}S_{0,196}N_{0,04}$	85	15
28.	растворитель Р–3	$C_{5,452}H_{7,606}O_{0,535}$	95	19
29.	растворитель Р–4	$C_{6,231}H_{7,798}O_{0,223}$	150	15
30.	растворитель Р–5	$C_{5,309}H_{8,655}O_{0,897}$	200	14
31.	растворитель Р–12	$C_{6,837}H_{9,217}O_{0,515}$	60	16
32.	растворитель М	$C_{2,761}H_{7,147}O_{1,187}$	70	19
33.	растворитель РМЛ	$C_{2,645}H_{6,810}O_{1,038}$	80	16
34.	растворитель РМЛ–218	$C_{4,791}H_{8,318}O_{0,974}$	90	14
35.	растворитель РМЛ–315	$C_{5,962}H_{9,779}O_{0,845}$	100	17

5. Для веществ, приведенных в таблице, определить:

а) максимальные температуру и давление взрыва паровоздушной горючей смеси при стандартных условиях;

б) температуру и давление взрыва бедной горючей смеси, образовавшейся при испарении горючей жидкости вследствие аварийного разлива, если концентрация пара достигла нижнего концентрационного предела распространения пламени φ_n (значения φ_n для сложных веществ смотри в таблице приложений).

№	Вещество	Формула	№	Вещество	Формула
1.	бутанон	C_4H_8O	21.	этан	C_2H_6
2.	этилацетат	$C_4H_8O_2$	22.	диметилфосфат	$(CH_3)_2HPO_4$
3.	аллиловый спирт	C_3H_6O	23.	нитротолуол	$C_7H_7O_2N$
4.	фенилэтиловый эфир	$C_6H_{10}O$	24.	фталева кислота	$C_8H_4O_3$
5.	пентановая кислота	$C_5H_{10}O_2$	25.	бензиловый спирт	C_7H_8O
6.	диоксан	$C_4H_8O_2$	26.	этилацетат	$C_4H_8O_2$
7.	гексадиен	C_6H_{10}	27.	циклогексанол	$C_6H_{12}O$
8.	этилтолуол	C_9H_{12}	28.	нитротолуол	$C_7H_7NO_2$
9.	метилбутират	$C_5H_{10}O_2$	29.	диэтилсульфид	$(C_2H_5)_2S$
10.	бутаналь	C_4H_8O	30.	о-ксилол	C_8H_{10}
11.	нитротолуол	$C_7H_7NO_2$	31.	бутановая кислота	$C_4H_8O_2$
12.	гексилметилкетон	$C_8H_{16}O$	32.	диизопропилкетон	$C_7H_{14}O$

Глава 2. Энергетический баланс процесса горения

№	Вещество	Формула	№	Вещество	Формула
13.	толуол	C_7H_8	33.	бензилбензоат	$C_{14}H_{12}O_2$
14.	бутанол	$C_4H_{10}O$	34.	этилбензол	C_8H_{10}
15.	амилметилкетон	$C_7H_{14}O$	35.	амилциклогексан	$C_{11}H_{22}$
16.	уайт-спирит	$C_{10,5}H_{21,0}$	36.	бензин Б-70	$C_{7,267}H_{14,796}$
17.	керосин КО – 20	$C_{13,595}H_{28,8}$	37.	бензин А-72(з)	$C_{6,991}H_{13,108}$
18.	керосин КО – 22	$C_{10,914}H_{21,8}$	38.	бензин А-93 (л)	$C_{7,024}H_{13,706}$
19.	керосин КО – 25	$C_{11,054}H_{21,7}$	39.	бензин А-93 (з)	$C_{6,911}H_{12,168}$
20.	дизельное топливо "З"	$C_{12,343}H_{23,8}$	40.	дизельное топливо "Л"	$C_{14,511}H_{29,120}$

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 1 — Молярная энтальпия продуктов горения при постоянном давлении

Температура, К	Энтальпия, кДж·моль ⁻¹									
	Воздух	CO ₂	H ₂ O	N ₂	HF	HCl	HBr	SO ₂		
298,15	8,66	9,35	9,91	8,67	8,60	35,99	76,50	44,61		
400	11,64	13,36	13,36	11,64	11,56	38,96	79,50	78,86		
600	17,62	22,25	20,41	17,56	17,40	44,83	85,40	88,15		
800	23,86	32,14	27,93	23,71	23,28	50,82	91,50	98,33		
1000	30,36	42,72	35,94	30,13	29,25	57,04	97,80	109,04		
1200	37,09	53,77	44,48	36,78	35,36	63,48	104,40	120,08		
1400	44,00	65,19	53,51	43,61	41,63	70,12	111,20	131,35		
1600	51,05	76,87	62,97	50,58	48,08	76,94	118,10	142,77		
1800	58,20	88,70	72,82	57,65	54,70	83,90	125,20	154,31		
2000	65,44	100,71	83,02	64,81	61,45	90,99	132,40	165,95		
2200	72,76	112,82	93,41	71,97	68,27	98,08	139,60	177,55		
2400	80,14	125,04	104,14	79,26	75,26	105,34	147,00	189,27		
2600	86,58	137,32	115,08	86,57	82,32	112,67	154,40	201,21		
2800	95,06	149,69	126,22	93,91	89,48	120,09	161,70	213,16		
3000	102,60	162,10	137,56	101,30	96,74	127,64	169,40	225,15		
3200	110,17	174,55	149,05	108,71	104,04	135,06	177,00	237,24		
3400	117,77	187,06	160,69	116,14	111,40	142,62	184,70	249,36		
3600	125,41	199,61	172,47	123,61	118,84	150,24	192,40	261,59		
3800	133,08	212,19	184,37	131,08	126,33	157,90	200,00	273,89		
4000	140,77	224,81	196,42	138,58	133,85	165,60	207,90	286,20		

Таблица 2 — Объемная энтальпия продуктов горения при постоянном давлении

Температура, К	Энтальпия, кДж·м ⁻³									
	Воздух	CO ₂	H ₂ O	N ₂	HF	HCl	HBr	SO ₂		
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1220,44	3029,89	2858,55		
298,15	386,44	417,23	442,22	386,88	383,76	1605,98	3415,89	1990,63		
400	519,41	596,16	596,16	519,41	515,84	1738,51	3548,87	3518,97		
600	786,26	992,86	910,75	783,58	776,44	2000,45	3811,69	3933,51		
800	1064,70	1434,18	1246,32	1058,01	1038,82	2267,74	4083,89	4865,68		
1000	1354,75	1906,29	1603,75	1344,49	1305,22	2545,29	4366,8	5109,04		
1200	1655,07	2399,38	1984,83	1641,23	1577,8	2832,66	4660,87	5358,32		
1400	1963,41	2908,97	2387,77	1946,01	1857,65	3128,96	4963,41	5861,22		
1600	2278,00	3450,17	2809,91	2257,03	2145,47	3433,29	5273,99	6370,82		
1800	2597,06	3958,06	3249,44	2572,51	2440,88	3743,86	5589,92	6885,77		
2000	2920,13	4493,98	3704,60	2892,01	2742,08	4060,24	5911,65	7405,18		
2200	3246,77	5034,36	4168,23	3211,51	3046,43	4376,62	6231,15	7922,80		
2400	3576,08	5579,65	4647,03	3536,81	3358,32	4700,58	6559,57	8445,78		
2600	3863,45	6127,62	5135,21	3863,01	3673,36	5027,67	6892,01	8978,58		
2800	4241,86	6679,61	5632,31	4190,54	3992,86	5358,77	7217,32	9511,83		
3000	4578,31	7233,38	6138,33	4520,30	4316,82	5695,67	7563,14	10046,85		
3200	4916,11	7788,93	6651,05	4850,96	4642,57	6026,77	7901,83	10586,35		
3400	5255,24	8347,17	7170,46	5182,51	4970,99	6364,12	8244,09	11127,18		
3600	5596,16	8907,18	7696,12	5515,84	5302,99	6704,15	8587,24	11672,91		
3800	5938,42	9468,54	8227,13	5849,17	5637,22	7045,96	8933,51	12221,78		
4000	6281,57	10031,68	8764,84	6183,85	5972,78	7389,56	9281,12	12771,08		

Таблица 3 - Молярная внутренняя энергия продуктов горения при постоянном объеме

Температура, К	Внутренняя энергия продуктов горения, кДж·моль ⁻¹									
	Воздух	CO ₂	H ₂ O	N ₂	HF	HCl	HBr	SO ₂		
298,15	6,24	6,93	7,49	6,25	6,18	33,57	74,10	42,19		
400	8,39	10,11	10,11	8,39	8,31	35,71	76,20	75,61		
600	12,74	17,37	15,53	12,68	12,52	39,96	80,50	83,28		
800	17,36	25,64	21,43	17,21	16,78	44,32	85,00	91,83		
1000	22,23	34,59	27,81	22,00	21,12	48,91	89,70	100,92		
1200	27,34	44,02	34,73	27,03	25,61	53,73	94,70	110,33		
1400	32,62	53,81	42,13	32,23	30,25	58,74	99,80	119,98		
1600	38,05	63,87	49,97	37,58	35,08	63,94	105,10	129,77		
1800	43,57	74,07	58,19	43,02	40,07	69,27	110,60	139,69		
-000	49,18	84,46	66,77	48,55	45,19	74,74	116,20	149,70		
2200	54,88	94,94	75,53	54,09	50,39	80,20	121,70	159,68		
2400	60,63	105,54	84,64	59,75	55,75	85,84	127,50	169,77		
2600	65,45	116,19	93,95	65,44	61,19	91,54	133,30	180,09		
2800	72,30	126,94	103,46	71,15	66,72	97,33	138,90	190,41		
3000	78,22	137,72	113,18	76,92	72,36	103,26	145,10	200,78		
3200	84,16	148,55	123,04	82,70	78,03	109,05	151,00	211,24		
3400	90,14	159,43	133,06	88,51	83,77	114,99	157,10	221,74		
3600	96,15	170,36	143,21	94,35	89,58	120,98	163,10	232,34		
3800	102,20	181,31	153,49	100,20	95,44	127,02	169,30	243,02		
4000	108,26	192,31	163,91	106,07	101,34	133,09	175,40	253,70		

Таблица 4 — Теплоемкость и теплота образования простых веществ и продуктов горения

Вещество	Теплоемкость молярная c_p , Дж·моль ⁻¹ ·К ⁻¹	Коэффициенты уравнения $c_p = a + bT$, Дж·моль ⁻¹ ·К ⁻¹		Коэффициенты уравнения $c_p = a + bT$, Дж·м ⁻³ ·К ⁻¹		Теплота образо- вания, ΔH_f^0 кДж·моль ⁻¹
		a	$b \cdot 10^3$	a	$b \cdot 10^3$	
воздух	29,16	28,62	4,08	1172,95	167,21	0,00
O ₂	29,36	31,46	3,39	1289,34	138,93	0,00
N ₂	29,10	27,87	4,27	1142,21	175,00	0,00
NO	29,83	29,58	3,85	1212,30	157,79	90,37
NO ₂	37,11	42,93	8,54	1759,43	350,00	33,89
CO	29,15	28,41	4,10	1164,34	168,03	-110,5
CO ₂	37,13	44,14	9,04	1809,02	370,49	-393,51
C (графит)	8,53	17,15	4,27	—	—	0
H ₂	28,83	27,28	3,26	1118,03	133,61	0
H ₂ O (газ)	33,56	30,00	10,71	1229,51	438,93	-241,84
H ₂ O (жидкость)	75,31	—	—	—	—	-285,84
HF	29,16	27,70	2,93	1135,25	120,08	-268,61
HCl	29,16	26,53	4,60	1087,30	188,52	-92,30
HBr	29,16	26,15	5,86	1071,72	240,16	-35,98
HJ	29,16	26,32	5,94	1078,69	243,44	25,94
SO ₂	39,87	42,55	12,55	1743,85	514,34	-296,90
SO ₃	50,63	57,32	26,86	2349,18	1100,82	-395,20
H ₂ S	33,93	29,37	15,40	1203,69	631,15	-20,15
NH ₃	36,65	29,80	26,48	1221,31	1085,25	-46,19

Таблица 5 — Показатели пожаровзрывоопасности пыли некоторых кормов

№	Вещество	Элементный состав, мас. %					Показатели пожаровзрывоопасности				Q_{H_2} кДж·кг ⁻¹
		С	Н	О	N	S	Φ_{H_2} , Т·М ⁻³	P_{max} , кПа	dP/dt , МПа·с ⁻¹	Φ_{MBC} , об.%	
1	высевки пшеничные	43,6	7,0	44,7	3,4	1,25	55	483	6,2	11,8	17677
2	дрожжи кормовые	35,6	6,2	44,58	7,9	5,8	36	650	9,2	11,0	19087
3	кукуруза дробленая	43,5	5,4	47,15	2,6	1,35	37	651	6,9	11,5	17543
4	пшеница дробленая	47	6,95	41,11	3,7	1,3	38	524	14,2	12,8	17322
5	ячмень дробленый	43,5	6,0	46,01	3,1	1,42	47	645	11,4	12,3	17372
6	горох дробленый	45,8	6,5	42,8	3,6	1,3	52	620	19,3	11,8	18292
7	овес дробленый	46,6	6,77	43,23	3,1	0,34	54	650	4,67	12,0	19206
8	просо дробленое	44,1	6,82	46,02	2,5	0,58	36	—	—	—	18972
9	шрот подсолнечный	41,7	6,46	44,44	6,1	1,25	40	532	9,4	11,3	18368
10	шрот соевый	43	6,57	42,32	6,9	1,2	49	673	12,5	16,0	18485
11	шрот хлопка	45,1	6,41	41,72	5,3	1,56	42	547	4,07	12,5	21786

Таблица 6— Объемные теплоты сгорания и минимальные энергии зажигания газов и жидкостей

Вещество		Теплота сгорания, кДж·м ⁻³			Минимальная энергия зажигания, мДж	Теплота образования, ΔН ⁰ _{f, кДж·моль⁻¹}	t _{св} , °С
название	формула	высшая, Q'' _в	низшая, Q'' _н				
метан	СН ₄	39820	35880	0,28	-74,8	537	
этан	С ₂ Н ₆	70310	64360	0,24	-84,68	515	
пропан	С ₃ Н ₈	101210	93180	0,22	-103,8	470	
н-бутан	С ₄ Н ₁₀	133800	123570	0,25	-126,0	405	
пентан	С ₅ Н ₁₂	169270	150630	0,22	-146,4	286	
н-гексан	С ₆ Н ₁₄	187400	187400	0,25	-167,2	233	
н-гептан	С ₇ Н ₁₆	216880	200550	0,25	-187,7	223	
циклогексан	С ₆ Н ₁₂	—	—	0,22	-123,13	259	
изооктан	С ₈ Н ₁₈	—	—	1,35	—	411	
водород	Н ₂	12750	10790	0,017	0	510	
сульфид водорода	Н ₂ С	25350	23700	0,068	—	246	
сульфид углерода	СS ₂	—	—	0,009	88,7	102	
оксид углерода	СО	12640	12640	—	-110,5	605	
этилен	С ₂ Н ₄			0,12		435	
этилцеллозольв	С ₄ Н ₁₀ О ₂			0,15	-405,0	235	
бензин АИ-92				0,3		435	
уайт-спирит	С _{10,5} Н ₂₁	—	—	0,33		250	
л-ксилол	С ₈ Н ₁₀			84,5	-24,4	528	

Таблица 7- Теплота образования жидкостей

Вещество	Формула	ΔH°_f , кДж·моль ⁻¹
акролеин	C_3H_4O	-58,5
алиловый спирт	C_3H_6O	-131,8
амилбензол	$C_{11}H_{16}$	-34,4
амилметилкетон	$C_7H_{14}O$	-291
амиловый спирт	$C_5H_{12}O$	-302,5
амилциклогексан	$C_{11}H_{22}$	-233,8
анилин	C_6H_7N	109
ацетон	C_3H_6O	-217,57
ацетонитрил	C_2H_3N	-25,62
бензилбензоат	$C_{14}H_{12}O_2$	-372,84
бензиловый спирт	C_7H_8O	-220,86
бензол	C_6H_6	82,9
бутаналь	C_4H_8O	-205
бутандиол-2,3	$C_4H_{10}O_2$	-445,5
бутановая кислота	$C_4H_8O_2$	-486,3
бутанон	C_4H_8O	-238,3
изобутилацетат	$C_6H_{12}O_2$	-535,5
бутилбензол	$C_{10}H_{14}$	-13,7
бутилметилкетон	$C_6H_{12}O$	-272
бутанол	$C_4H_{10}O$	-274,6
бутилфенол	$C_{10}H_{14}O$	-285,12
бутилформиат	$C_5H_{10}O_2$	-437,6
валеролактон	$C_5H_8O_2$	-421,14
гексадекан	$C_{16}H_{34}$	-373,3
гексадиен	C_6H_{10}	-94,1
валериановая кислота	$C_5H_{10}O_2$	-490,4
валериановый альдегид	$C_5H_{10}O$	-227,8
гексан	C_6H_{14}	167,2
гексилметилкетон	$C_8H_{16}O$	-311,7
гексиловый спирт	$C_6H_{14}O$	-319,8
гептан	C_7H_{16}	-187,7
декан	$C_{10}H_{22}$	-249,6
диацетоновый спирт	$C_6H_{12}O_2$	-425
дибутиловый эфир	$C_8H_{18}O$	-333,9

диизопропилкетон	$C_7H_{14}O$	-291
диоксан	$C_4H_8O_2$	-434,16
дипропиловый эфир	$C_6H_{14}O$	-293,4
диэтиламин	$C_4H_{11}N$	-137,34
диэтиленгликоль	$C_4H_{10}O_3$	-642,84
диэтилизопропилметан	C_8H_{18}	-211,2
диэтилкетон	$C_5H_{10}O$	-252
диэтиловый эфир	$C_4H_{10}O$	-252,2
додекан	$C_{12}H_{26}$	-290,9
изопропенилбензол	C_9H_{10}	-112,9
крезол	C_7H_8O	-158
ксилидин	$C_8H_{11}N$	-85,26
кумол	C_9H_{12}	-21,5
мезитилен	C_9H_{12}	-15,9
метиламинол	$C_6H_{14}O$	-344,2
метанол	CH_4O	-201,3
мethylацетат	$C_3H_6O_2$	-409,1
метилбутират	$C_5H_{10}O_2$	-485
метилгексан-2	C_7H_{16}	-194,9
метилпентальдегид	$C_6H_{12}O$	-249,1
метилпропионат	$C_4H_8O_2$	-438,8
метилпропилкетон	$C_5H_{10}O$	-258,6
метилформиат	$C_2H_4O_2$	-349,8
метилциклогексан	C_7H_{14}	-154,7
метоксиэтилацетат	$C_5H_{10}O_3$	-573,6
муравьиная кислота	CH_2O_2	-210,6
м-ксилол	C_8H_{10}	17,25
нонан	C_9H_{20}	-229
нониловый спирт	$C_9H_{20}O$	-387
метилциклопентан	C_6H_{12}	-106,6
октан	C_8H_{18}	-208
октаналь	$C_8H_{16}O$	-643,96
октановая кислота	$C_8H_{16}O_2$	-565,3
октиловый спирт	$C_8H_{18}O$	-357
октилциклогексан	$C_{14}H_{28}$	-295,6
пентан	C_5H_{12}	-146,4

пентанол-2	$C_5H_{12}O$	-314,13
пиридин	C_5H_5N	140,6
пиррол	C_4H_5N	63
пропаналь	C_3H_6O	-221,7
пропиламин	C_3H_9N	-101,5
пропилбензол	C_9H_{12}	-7,9
пропилбутират	$C_7H_{14}O_2$	-556,8
пропиленгликоль	$C_3H_8O_2$	-499,9
пропанол	C_3H_8O	-257,7
пропилформиат	$C_4H_8O_2$	- 417
пропилциклогексан	C_9H_{18}	-193,3
пропилциклопентан	C_8H_{16}	-148
пропилэтилкетон	$C_6H_{12}O$	-272
пропионовая кислота	$C_3H_6O_2$	-466
пропионовый ангидрид	$C_6H_{10}O_3$	-289
стирол	C_8H_8	155,6
тетрагидрофуран	C_4H_8O	-214
тетраметилбензол	$C_{10}H_{14}$	-41,9
тетраметилгептан	$C_{11}H_{24}$	-276,2
тетраметилпентан	C_9H_{20}	-273,2
толуол	C_7H_8	50,17
тридекан	$C_{13}H_{28}$	-311,5
триметилбензол	C_9H_{12}	-15,9
триметилгексан	C_9H_{20}	-254
уксусная кислота	$C_2H_4O_2$	-437,3
уксусный ангидрид	$C_4H_6O_3$	-328
ундеканол	$C_{11}H_{24}O$	-422,5
фенилэтиловый эфир	$C_8H_{10}O$	-84
хлорбензол	C_6H_5Cl	51,4
цимол	$C_{10}H_{14}$	28,8
этилацетат	$C_4H_8O_2$	-442,9
этилбензол	C_8H_{10}	29,9
этиленгликоль	$C_2H_6O_2$	-453,8
этилтолуол	C_9H_{12}	-1,6
этилформиат	$C_3H_6O_2$	-371,2
этилциклогексан	C_8H_{16}	-171,7

Термины и определения

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Возникновение горения – это быстрый переход медленной окислительно-обновленной реакции к мгновенному преобразованию исходных веществ в продукты реакции за счет самоускорения. Это превращение носит взрывной характер и сопровождается вспышкой или звуковым эффектом.

Высшая теплота сгорания – количество тепла, выделяющегося при полном сгорании единицы количества горючего вещества при условии, что горючая смесь и продукты горения находятся при стандартных условиях, а вода в продуктах горения находится в сконденсированном (жидком) состоянии.

Горение – сложный физико-химический процесс, основой которого является быстрая окислительно-восстановительная реакция, сопровождающаяся интенсивным выделением энергии в виде тепла и светового излучения.

Дым – это дисперсная система, состоящая из твердых и жидких частичек размером $10^{-5} \div 10^{-8}$ м (дисперсной фазы), зависших в газовой дисперсионной среде.

Концентрационные пределы распространения пламени (КПРП) (нижний или верхний) – такие наименьшая и наибольшая концентрации горючего пара или газа в воздухе, при которых достигается граничная для зажигания и распространения горения концентрации горючего компонента или воздуха, соответственно.

Коэффициент избытка воздуха (α) – коэффициент, который показывает, во сколько раз количество воздуха, который действительно поступает в зону горения, отличается от теоретически необходимого количества воздуха для полного сгорания горючего вещества.

Низшая теплота сгорания вещества – это количество тепла, выделяющегося при полном сгорании единицы количества горючего вещества при условии, что горючая смесь и продукты горения находятся при стандартных условиях, а вода, входящая в состав продуктов горения, находится в газообразном состоянии.

Пламя – это газовый объем, в котором происходят все процессы, которые связаны с подготовкой горючей смеси к горению, и сам процесс горения.

Продукты горения – это газообразные, твердые и жидкие вещества, образующиеся при взаимодействии окислителя с горючим веществом в процессе горения.

Стандартная теплота образования вещества ΔH_f^0 –

это теплота реакции, при протекании которой в стандартных условиях ($P = 101,3$ кПа, $T = 298$ К) образуется один моль сложного вещества из простых веществ, стойких при стандартных условиях.

Стехиометрическая концентрация – концентрация горючего вещества, соответствующая уравнению реакции горения.

Температура горения – температура, до которой нагреваются продукты горения во время их образования в зоне горения.

Тепловой эффект реакции – количество тепла, выделяющегося или поглощаемого системой во время протекания в ней необратимой химической реакции (химическая энергия превращается в тепловую) при условии постоянства температуры и объема или температуры и давления.

Теплота сгорания – количество тепла, выделяющегося при полном сгорании единицы количества горючего вещества с образованием продуктов полного сгорания при условии, что начальные и конечные продукты находятся при стандартных условиях.

**ПРЕДМЕТНЫЙ
УКАЗАТЕЛЬ**

В

вещества пирофорные, 166

Г

горение, 7, сл.

- энергетический баланс, 59

- материальный баланс, 10

- уравнение реакции, 15

Д

дым, 24

давление взрыва, 107

И

избыток воздуха, 28

К

коэффициент

- стехиометрический, 16

- избытка воздуха, 27

концентрация стехиометрическая, 17

Н

нагрузка пожарная, 79

О

объем воздуха, 29, 44, сл.

объем продуктов горения, 30,
45

П

пламя, 10, сл.

продукты горения, 24, сл.

Р

реакция

- горения, 16, 20, 21

- тепловой эффект, 59

Т

температура

- взрыва, 106

- горения, 80, сл.

теплота

- сгорания, 62, сл., 69, 73

- образования, 63, 66

Э

энергия

- внутренняя, 60

энтальпия, 60

ЛИТЕРАТУРА

1. Процессы горения / Абдурагимов И.М., Андросов А.С., Исаева Л.К., Крылов Е.В. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1984. – 268 с.
2. Демидов П.Г., Шандыба В.А., Щеглов П.П. Горение и свойства горючих веществ. – М.: Химия, 1981. – 311 с.
3. Демидов П.Г., Саушев В.С. Горение и свойства горючих веществ. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1975. – 280с.
4. Исаев С.И. Курс химической термодинамики. – М.: Высшая школа, 1986. – 232 с.
5. Монахов В.Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. – М.: Химия, 1979. – 424 с.
6. Соколик А.С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. – М.: Изд-во АН СССР, 1960.
7. Справочник “Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения”/ Под редакцией А.Н. Баратова и А.Я. Корольченко, ч. I и II. – М.: Химия, 1990. – 650 с.
8. Баратов А.Н., Иванов Е.Н., Корольченко А.Я и др. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность. Справочник. – М.: Химия, 1987. – 272 с.
9. Справочник химика / Под ред. Б.П. Никольского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1963. Т.1. – 1002 с.

10. Розловский А.Н. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. – М.: Химия, 1980. – 376 с.
11. Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. – Харків: АПБУ, 2002. – 352 с.
12. Блинов В.И., Худяков Г.Н. Диффузионное горение жидкостей. – М.: РИСО АН СССР, 1961. – 210 с.
13. Таубкин С.И., Таубкин И.С. Пожаро- и взрывоопасность пылевидных материалов и технологических процессов их переработки. – М.: Химия, 1976. – 212 с.
14. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли. – М.: Химия, 1986. – 242 с.
15. Абдурагимов И.М., Говоров В.Ю., Макаров В.Е. Физико–химические основы развития и тушения пожара. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980. – 255 с.
16. Повзик Я.С., Ключ П.П., Матвейкин А.М., Пожарная тактика. – М.: Стройиздат, 1990. – 283 с.
17. Иванников В.П., Ключ П.П. Справочник руководителя тушения пожара. – М.: Стройиздат, 1987. – 288 с.
18. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров: Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1990. – 265 с.

19. Термогазодинамика пожаров в помещениях / Астапенко В.М., Кошмаров Ю.А., Молчадский И.С. и др. – М.: Стройиздат, 1988. – 295 с.

20. Романенко И.М., Кошмаров Ю.А., Башкирцев М.П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1977. – 415 с.

МАЗМҰНЫ

КІРІСПЕ.....	191
1 БӨЛІМ. ЖАНУ ҮРДІСІНІҢ ЖАЛПЫ СИПАТТАМАСЫ	193
1 ТАРАУ. ЖАНУ ҮРДІСІНІҢ МАТЕРИАЛДЫҚ ТЕҢГЕРІМІ	197
§ 1. Жаңғыш заттың құрамы бойынша диффузионды жалынның түсін анықтау	197
§ 2. Жеке заттың жану реакция теңдеуін құрастыру	205
§ 3. Жану үрдісінің материалдық теңгерімін есептеу	217
Бақылауға арналған тапсырмалар.....	253
2 ТАРАУ. ЖАНУ ҮРДІСІНІҢ ЖЫЛУЛЫҚ ТЕҢГЕРІМІ	264
§ 1. Жеке заттар мен күрделі қосылыстардың жану жылулығын есептеу.....	274
§ 2. Заттардың жану температурасын есептеу.....	294
§ 3. Бу-ауа және газ-ауа қоспаларының жарылыс температурасын есептеу	329
Бақылауға арналған тапсырмалар.....	346
ҚОСЫМШАЛАР	354
АНЫҚТАМАЛАР.....	363
ӘРІПТІК КӨРСЕТКІШ	366
ӘДЕБИЕТ	367

КІРІСПЕ

Жану – өрт пен жарылыстарда жүретін негізгі үрдіс. Жану үрдістерінің пайда болу, даму және тоқтауының заңдылықтарын білу азаматтық қорғаныс мамандарына төтенше жағдайларын алдын алу мен жоюдың мәселелерін тиімді шешуге мүмкіндік береді.

«Жанудың дамуы мен сөндіру теориясы» пәні жану үрдісінің пайда болу мен даму заңдылықтарын, жанудың жарылысқа айналу шарттарын игеруге, заттар мен материалдардың жану мен жарылыс қауіптілік параметрлерін анықтаудың есеп және тәжірибелік әдістерін, жануды тоқтату теориясының негізгі қағидаларын, өрт дамуының физикалық-химиялық негіздерін және әртүрлі өрт сөндіругіш құралдардың әсер ету механизмдерін қарастыруға арналған.

Теориялық материал химия, физика, термодинамика және жылу алмасудың оқу бағдарламалына негізделген. Кәсіби бағытталған пән ретінде «Жанудың дамуы мен сөндіру теориясы» жану мен жарылыс қауіптілік бойынша теориялық зерттеулерді, азаматтық қорғаныстың өртке қарсы қызметінің тәжірибелік білімін қорытып қолданады. Ғылыми пән ретінде «Жанудың дамуы мен сөндіру

теориясы» ғылыми-зерттеу мәселелерін шешу, халық шаруашылық нысандарында өрт қауіпсіздігі шарттарын қамтамасыз ету кезінде инженерлік есептерін жүргізу, өрттің қауіпті факторларының даму динамикасын болдамдаудың теориялық негізі болып табылады.

Практикумда келтірілген әдістемелер заттар мен материалдардың өрт қауіпі параметрлерін анықтауға, техногенді төтенше жағдайларың зардаптарын болжамдауға мүмкіндік береді. Осындай нәтижелер азаматтық қорғаныс саласындағы жұмыскерлерге тұрғындар мен аумақтардың, материалдық және мәдени құндылықтардың қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін, төтенше жағдайлар зардаптарынан қоршаған ортаны қорғау үшін қажет.

1 БӨЛІМ. ЖАНУ ҮРДІСІНІҢ ЖАЛПЫ СИПАТТАМАСЫ

Жану – жылу және жарық сәулелену түрінде қарқынды энергияның бөлінуімен жүретін, негізінде жылдам тотығу-тотықсыздану реакциясы жататын күрделі физико-химиялық процесс [1] – [3]. Қарапайым тотығу-тотықсыздану реакцияларынан жанудың ерекшелігі – бұл химиялық реакция жүрудің жоғары жылдамдығы.

Жану үрдістері бірнеше белгілер бойынша жіктеледі.

1. Жану аумағында жаңғыш қоспа компоненттерінің агрегаттық күйі бойынша.

Гомогенді жану – жану аумағында жаңғыш қоспаның барлық компоненттері бірдей агрегаттық күйде (газдардың, сұйықтықтар буларының, оттегі немесе ауа ортасында қатты жаңғыш материалдар ыдырауының газды өнімдерінің жануы) болатын жағдайда байқалады.

Гетерогенді жану - жану аумағында жаңғыш қоспаның компоненттері әртүрлі агрегаттық күйде болатын жағдайда байқалады; жану конденсацияларған фаза бетінде жүреді (көміртекті қалдықтардың, кокстың, ұшқыш емес металлдардың жануы).

2. Жаңғыш қоспаның пайда болу әдісі бойынша.

Жану үрдісі екі сатыда өтеді: жану аумағына қоспа компоненттерінің диффузиясы және жану аумағындағы химиялық реакция. Яғни, бастапқы заттардың жану өнімдеріне айналу жылдамдығы келесі факторлардан тәуелді болады: 1) молекулярлы және турбулентті диффузия арқылы реагенттердің араласу жылдамдығынан; 2) химиялық реакция жылдамдығынан. Үрдістің жалпы жылдамдығы ең баяу жүретін кезең жылдамдығымен анықталады.

Диффузионды жану – жану аумағына жаңғыш қоспа компоненттерінің диффузия шартында жүреді. Сондықтан үрдістің жылдамдығы ең баяу жүретін кезең ретінде диффузия жылдамдығымен анықталады. Гетерогенді жану кезінде реакция аумағына оттегі диффузияланады.

Кинетикалық жану – жану аумағында компоненттердің араласу кезеңі болмайтын, яғни жаңғыш қоспаның алдын ала пайда болу шартындағы жану. Сондықтан жану үрдісінің жылдамдығы химиялық реакция жылдамдығымен (кинетикасымен) анықталады.

3. Жану таралудың механизмі бойынша.

Дефлаграционды жану – жану аумағынынан жылуөткізгіштік және сәулелену арқылы суық жаңғыш қоспа қабаттарына біртіндеп жылу таралып, жану үрдісі жүреді.

Детонационды жану – жану өнімдерімен пайда болған соққы толқынының жылдам адиабаттық қысу арқылы жану таралады.

4. Жанудың газ динамикалық режимі бойынша.

Ламинарлы жану – жану жаңғыш қоспа компоненттері реакция аумағына молекулярлық немесе әлсіз конвекциялық диффузия заңдары бойынша таралу шартында жүреді. Қоспадағы жеке бөлшектердің жүру бағыты бірдей болады.

Турбулентті жану - жану жаңғыш қоспа компоненттері жану аумағына жылдам, қарқынды айналу және жану өнімдерінің бастапқы қоспамен толық араласу шартында жүреді. Қоспадағы жеке бөлшектердің қозғалыс бағыты сәйкес келмейді.

Газ динамикалық жану режимінің параметрі болып Рейнольдс көрсеткіштің сандық мөлшері табылады:

егер $Re < 2300$ – жалын ламинарлы;

егер $2300 < Re < 10\ 000$ – жалын ауыспалы;

егер $Re > 10\ 000$ – жалын турбулентті.

Кез келген химиялық үрдіс сияқты, жану үрдісі масса және энергия сақталу заңдарына бағынады. Осы заңдардың жану үрдісі үшін қалай орындалатын толық қарастырайық.

1 ТАРАУ.

ЖАНУ ҮРДІСІНІҢ МАТЕРИАЛДЫҚ ТЕҢГЕРІМІ

§ 1. Жаңғыш заттың құрамы бойынша

диффузионды жалынның түсін анықтау

Жалын – бұл жаңғыш қоспаның жануға дайындалумен және нақты жану үрдісімен байланысты барлық үрдістер жүретін газды көлем.

Жалын құрылысында шартты түрде бірнеше аумақты бөлуге болады: дайындалу, жану және жану өнімдер [1].

Дайындалу аумағында заттардың құрылымдық химиялық элементтеріне (көміртегі, сутегі және т.б.), радикалдарға және функционалды топтарға термиялық ыдырауы жүреді. Егер дайындалу аумағында ауа оттегісі немесе жаңғыш заттың ыдырауы нәтижесінде түзілетін оттегі болса, онда көміртегінің алдын ала тотығуы жүріп, жану аумағына оттегі СО молекула түрінде кіреді.

Жану аумағында алдын ала тотығу өнімдерінің, көміртегінің, сутегінің соңғы өнімдерге дейін (СО₂, Н₂О) жылдам жануы жүреді. Екі атомды (СО) және үш атомды (СО₂, Н₂О) газдардың сәулелену спектрлері адамның жарық қабылдау аумағынан шек орналасқан, сондықтан олардың жалын түсіне үлесін есепке алмауға болады.

Егер жану аумағына молекулярлы оттегі кірсе, онда ол қызып, жану аумағының сәулеленуіне әкеледі.

Егер молекулярлы көміртегі жану аумағында тотығып үлгермесе, онда ол жану өнімдері аумағына күл түрінде ауысады.

Кинетикалық жану жағдайында дайындалу аумағына жануға дайын қоспа стехиометриялық концентрация мөлшерінде кіреді. Осы аумақта жаңғыш заттың жартылай ыдырауы және қоспа құрамында болатын оттегімен алдын ала тотығуы жүреді. Жану аумағында мүлдем жарық бермейтін реакцияның соңғы өнімдері түзіледі, яғни жалын түссіз немесе көгілдір түсті болады.

Егер жануға түсетін қоспа құрамында тотықтырғыш аз болса, онда дайындалу аумағында алдын ала тотығу өнімдері түзілу үшін оттегі жетіспейді, сондықтан жану аумағына көміртегі қалдықтары кіріп, жалын сары түске боялады.

Диффузионды жану кезінде дайындалу аумағынан жаңғыш заттың диффузиясы арқылы және тотықтырғыштың қоршаған ортадан диффузиясы арқылы жаңғыш қоспа жану аумағында пайда болады. Диффузионды жалынның түсі жаңғыш заттың химиялық

құрамына және жану аумағындағы температураға байланысты.

Дайындалу аумағында жану үрдісі кезінде жаңғыш зат молекулаларының құрылымдық бөлшектерге (химиялық элементтерге, радикалдарға, функционалды топтарға) дейін термиялық ыдырауы жүреді, осыдан кейін жану аумағында олар тотығады. Егер жаңғыш заттың құрамында оттегі мөлшері жеткілікті болса, онда термиялық ыдырау кезінде бөлінетін көміртегі дайындалу аумағында толық көміртегі оксиді CO дейін тотығып үлгереді. CO жану аумағында жанып, толық жану өнімін – көмірқышқыл газын CO_2 түзеді. Осындай жағдайда жалынның түсі түссіз немесе әлсіз көгілдір болады. Мысалға, құмырсқа қышқылы осылай жанады.

Егер жану аумағына көміртегі бөлшектері кіретін болса, онда олар қызып, жалынның сары түске боялуына әкеледі. Ауаның жеткілікті мөлшерде болу шартында, жану аумағындағы көміртегі CO және CO_2 дейін тотығып үлгереді, нәтижесінде күл пайда болмайды. Жалын жарқын, бірақ қақталмаған болады.

Құрамында көміртегінің көп мөлшері бар заттардың жану кезінде немесе тотығу ортасында оттегінің

1 тарау. Жану үрдісінің материалдық теңгерімі

жетіспеушілік жағдайында, жану аумағындағы көміртегі тотығып үлгермей, жану өнімдері аумағына күл түрінде түседі. Бұл жағдайда жалын жарқын, бірақ қақталған болады.

Диффузионды жалынның жарықтануын жаңғыш заттың құрамындағы оттегі мен көміртегінің пайыздық мөлшерімен сипаттауға болады (сәйкес мәліметтер 1.1 кестеде көрсетілген).

1.1 кесте – Жаңғыш заттың құрамына байланысты диффузионды жалынның түсі

Жалын жарықтанудың сипаттамасы	Жаңғыш зат құрамында элементтердің мөлшері, %	
	оттегі	көміртегі
түссіз	50-ден көп	50-ге дейін
жарық, қақталмаған	25 – 50	50 – 75
жарық, қақталған	25-тен аз	75-тен көп

Жалын түсін анықтаудың тәжірибелік маңызы

1. Жалынның түсі бойынша құрамы белгілі жаңғыш заттың жану режимін анықтауға болады.

Егер есептеулер бойынша берілген жаңғыш заттың диффузионды жалыны жарық болса, ал іс жүзінде көгілдір болып шықса, онда жану кезінде жаңғыш заттың

тотықтырғышпен алдын ала араласуы жүретінін анықтауға болады, яғни жану кинетикалық режимде жүреді. Егер жалын сары болса, жану диффузионды режимде жүреді.

2. Диффузионды жалынның түсі бойынша белгісіз жаңғыш заттың құрамын анықтауға болады.

Егер жалын жарық және қақталған болса, онда жаңғыш заттың құрамында көміртегі мөлшері көп. Егер жалын жарық, бірақ қақталмаған болса, онда жаңғыш заттың құрамында көміртегі аз немесе оның құрамында аз мөлшерде оттегі бар. Егер диффузионды жалын көгілдір болса, онда жаңғыш заттың құрамында көміртегі мөлшері аз, ал оттегі мөлшері көп.

Егер жаңғыш заттың құрамында металл атомдары болса, онда жалын осыған сәйкес түске боялады (1.2 кестені қара).

1.2 кесте – Кейбір элементтер қосылыстарының жалын түсін бояу

Химиялық элемент	Жалын түсі
Al, Mg	ақ
K	күлгін
Rb, Cs	қызғылт-күлгін
In	көк-күлгін
Pb, As, Sb, Se	әлсіз-күлгін
Cu (CuCl ₂)	жасыл (көк)
B	жасыл
Tl, Te	жасыл
Ba, Mo	сарғыш-жасыл
Na	сары
Ca	күрең қызыл
Sr, Li	қызыл

3. Жалынға кірген қызған қатты денелердің жарықтану жарықтығы және жарықтану түсі бойынша және гетерогенді жану аумағының жалыны бойынша реакция аумағының температурасын анықтауға болады (1.3 кестені қара). Бұл ұстаным бойынша оптикалық пирометр жұмыс істейді.

1.3 кесте – Температураларына байланысты қызған қатты денелердің түсі

Қызған қатты дененің түсі	Температура, °С
жарқын-қызыл	550
күрең-қызыл	700
жарқын-шиє түсті	800
шиє түсті	900
шиє түсті	1000
сары	1100
жарқын-сары	1200
ақ	1300
жарқын-ақ	1400
қарауға мүмкінсіз ақ	> 1500

Диффузионды жалын түсін анықтау әдістемесі

3. Жаңғыш заттың молярлық массасын есептеу $\mu_{ГВ}$.

4. Жаңғыш зат құрамында оттегі мен көміртегі пайыздық мөлшерін:

$$\text{O мөлшері: } \varphi_{\text{O}} = \frac{n_{\text{O}} \cdot \mu_{\text{O}}}{\mu_{\text{ГВ}}} 100, \% \quad (1.1)$$

$$\text{C мөлшері: } \varphi_{\text{C}} = \frac{n_{\text{C}} \cdot \mu_{\text{C}}}{\mu_{\text{ГВ}}} 100, \% \quad (1.2)$$

мұнда n_{O} , n_{C} – молекуладағы сәйкес оттегі және көміртегі атомдар саны;

1 тарау. Жану үрдісінің материалдық теңгерімі

μ_{O} , μ_{C} – оттегі мен көміртегінің молярлық массалары, кг·кмоль⁻¹;

$\mu_{\text{ГВ}}$ – жаңғыш заттың молярлық массасы, кг·кмоль⁻¹.

3. 1.1 кесте бойынша диффузионды жалынның түсін анықтау. Егер оттегі және көміртегі бойынша анықталған жалын түстері сәйкес келмесе, онда жалын түсін оттегі бойынша анықтау қажет.

Есепті шығару мысалы

Пропион ангидридiнiң $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_3$ диффузионды жалын түсiн анықтау.

Шығару

1. Жаңғыш заттың молярлық массасын есептейміз:

$$\mu_{\text{ГВ}} = n_{\text{C}} \cdot 12 + n_{\text{H}} \cdot 1 + n_{\text{O}} \cdot 16 = 6 \cdot 12 + 10 \cdot 1 + 3 \cdot 16 = 130$$

кг·кмоль⁻¹.

2. (1.1, 1.2) формулалары бойынша жаңғыш заттың құрамындағы оттегі мен көміртегінің пайыздық мөлшерін есептейміз:

О мөлшері:
$$\varphi_O = \frac{3 \cdot 16 \cdot 100}{130} = 36,9 \% ;$$

С мөлшері:
$$\varphi_C = \frac{6 \cdot 12 \cdot 100}{130} = 55,4 \% .$$

3. 1.1 кесте бойынша диффузионды жалын түсін анықтаймыз: О мөлшері – 25 – 50 % аралығында, С мөлшері – 50 – 75 % аралығында, сондықтан пропион ангидридiнiң диффузионды жалыны жарқын, бiрақ қақталмаған болады.

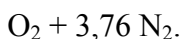
§ 2. Жеке заттың жану реакция теңдеуін құрастыру

Жану – өрт кезіндегі негiзгi құбылыс. Бұл жаңғыш заттың тотықтырғышпен әрекеттесу нәтижесінде жану өнiмдерiнiң түзiлу және энергияның көп мөлшерде бөлiнуiмен жүретiн, негiзiнде жылдам тотығу реакциясы жататын физикалық-химиялық үрдiс.

Өрт кезiнде жану ауа ортасында жүредi. Жаңғыш затпен тек оттегi әрекеттеседi, ауаның басқа компоненттерi химиялық реакцияға қатыспады, бiрақ олар жылу алмасу және масса алмасу үрдiстерiне қатысады, сондықтан реакция теңдеуiн құрастыру кезiнде оларды ескередi [5], [6].

1 тарау. Жану үрдісінің материалдық теңгерімі

Ауаның химиялық құрамы: оттегі - 21%, азот, көміртегі диоксиді және басқа инертті газдар - 79 %. Сондықтан ауаның құрамындағы оттегінің бір көлеміне азоттың 3,76 көлемі сәйкес келеді, яғни $79/21 = 3,76$. Кейде, ауаның ылғалдылығын ескертеді, онда оттегінің 1 моль мөлшеріне 3,84 моль азот сәйкес келеді. Әдетте, жану реакция теңдеуінде ауа құрамын келесі түрде жазады:



Бұл жағдайда ауа жану реакция аумағына 1 моль жаңғыш заттың (ЖЗ) толық жануына қажетті мөлшерде енеді деп санаймыз. Яғни, жану реакция нәтижесінде тек толық жану өнімдері (ЖӨ) түзіледі. Сонда жалпы жану реакциясының теңдеуі келесі түрде жазылады:

$$1GB + \beta(O_2 + 3,76N_2) = \sum_i n_i ПГ_i, \quad (1.3)$$

мұнда n_i – i компоненті бойынша жану өнімдерінің моль саны, моль;

β – *стехиометриялық коэффициент*, 1 моль жаңғыш заттың толық жануына қажетті оттегінің моль санын көрсетеді.

Стехиометриялық коэффициент келесі формула бойынша есептеледі:

$$\beta = n_C + n_S + \frac{n_H - n_X}{4} - \frac{n_O}{2} + \frac{5n_P}{4}, \quad (1.4)$$

мұнда n_C , n_H , n_O , n_P , n_S , n_X – жаңғыш заттың құрамындағы көміртегі, сутегі, оттегі, фосфор, күкірт, галоген атомдарының саны.

Қоспа құрамында компоненттердің концентрациясы өзгерген кезде химиялық реакция жылдамдығы да өзгереді. Реакцияның максималды жылдамдығы компоненттердің эквиваленттік қатынастары кезінде орындалады. Яғни, егер әрекеттесетін заттардың артық немесе жеткіліксіз болмаған жағдайда толық жүрсе. Бұл ара қатынас реакция теңдеуінде стехиометриялық коэффициентпен анықталады.

Жану реакция теңдеуіне сәйкес келетін жаңғыш заттың концентрациясын **стехиометриялық концентрация**. Стехиометриялық концентрация пайыздық көлемде (көлемдік $\varphi_{\text{СТМ}}$) және 1 м^3 жаңғыш қоспаның

1 тарау. Жану үрдісінің материалдық теңгерімі
құрамында болатын заттың массасы (массалық $\varphi'_{\text{стм}}$)
бойынша анықталуы мүмкін.

Стехиометриялық концентрацияны жану реакция бойынша есептейді (1.3). Жаңғыш қоспа 1 моль жаңғыш заттан және $\beta(1 + 3,76)$ моль ауадан тұрады. Яғни, жаңғыш қоспаның жалпы саны $(1 + \beta \cdot 4,76)$ моль құрайды. Жаңғыш қоспаның жалпы моль санын 100 % - деп аламыз да бастапқы қоспа құрамындағы жаңғыш заттың пайыздық мөлшерін пропорция арқылы анықтаймыз:

$$(1 + \beta \cdot 4,76) \text{ моль} - 100 \%$$

$$1 \text{ моль} - \varphi_{\text{стм}} \%$$

Көлемдік пайыз бойынша стехиометриялық концентрацияны анықтау үшін келесі формуланы қолданамыз:

$$\varphi_{\text{стм}} = \frac{100}{1 + \beta \cdot 4,76}, \%$$
 (1.5)

Егер жану оттегі ортасында жүрсе, онда жаңғыш заттың стехиометриялық концентрациясы келесі формуламен анықталады:

$$\varphi_{\text{СТМ}} = \frac{100}{1 + \beta}, \% \quad (1.6)$$

Бұлар мен газдардың массалық стехиометриялық концентрациясын анықтау кезінде 1 моль заттардың масса және көлем арасындағы ара қатынасты ескереді. Яғни, заттардың массалық стехиометриялық концентрациясын келесі формула бойынша анықтайды:

$$\varphi'_{\text{СТМ}} = 10\varphi_{\text{СТМ}} \frac{\mu_{\text{ГР}}}{V_{\mu}}, \text{ Г} \cdot \text{М}^{-3}, \quad (1.7)$$

немесе тікелей ауадағы жану реакция теңдеуі бойынша:

$$\varphi'_{\text{СТМ}} = \frac{1000\mu_{\text{ГР}}}{(1 + 4,76\beta)V_{\mu}}, \text{ Г} \cdot \text{М}^{-3}; \quad (1.8)$$

оттегі ортасында жану жағдайында:

$$\Phi'_{\text{СТМ}} = \frac{1000\mu_{\text{ГР}}}{(1 + \beta)V_{\mu}}, \text{ Г} \cdot \text{М}^{-3}, \quad (1.9)$$

мұнда $\mu_{\text{ГР}}$ – жаңғыш заттың молярлық массасы, $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$;

V_{μ} – берілген жағдайда 1 киломоль газдың көлемі, $\text{м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$, келесі формула бойынша есептейді:

$$V_{\mu} = 22,4 \cdot \frac{101,3 \cdot T}{273 \cdot P}, \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}. \quad (1.10)$$

Қалыпты жағдайда ($T = 273 \text{ К}$, $P = 101,3 \text{ кПа}$) $V_{\mu} = 22,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$; тұрақты жағдайда ($T = 298 \text{ К}$, $P = 101,3 \text{ кПа}$) $V_{\mu} = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$.

Реакция теңдеуін құрастыру және стехиометриялық концентрацияны анықтаудың тәжірибелік маңызы

1. Заттардың жану реакция теңдеуі жану үрдісінің материалдық және энергетикалық теңгерім негізінде жатады.

2. Заттардың өрт қауіптілігі бойынша маңызды көрсеткіштерін, яғни: жану жылулығы, жалын таралудың концентрациялық шектері, жану температурасы, стехиометриялық концентрация, жарылыс кезінде температура мен максималды қысым, жалын таралудың температуралық шектерін анықтау кезінде қолданады.

3. Жаңғыш заттың стехиометриялық концентрациясы оның ең жақсы жану шарттарын анықтайды. Бұл жағдайда заттың жану параметрлері ең қауіпті мөлшерлеріне ие болады: өздігінен жану температурасы – ең төмен, жану температурасы, жарылыс қысымы және өртті сөндіру үшін өрт сөндіргіш заттардың шығыны – ең жоғары.

Жану реакция теңдеуін құрастыру әдістемесі

1. Теңдеу 1 моль жаңғыш зат көлеміне жазылады, сондықтан теңдеу құрастыру кезінде жартылай коэффициенттер қолдануға болады.

2. Көбінесе тотырғыш ретінде оттегі болып табылады, оның құрамын келесі түрде алады ($O_2 + 3,76N_2$).

3. Жаңғыш зат пен ауа стехиометриялық ара қатынаста болады, (1.3) формулаға сәйкес.

4. Жану реакция теңдеуін құрастыру кезінде тек толық жану өнімдері түзіледі деп есептейді. Жану өнімдерінің сапалық құрамын жаңғыш заттың элементті құрамын есепке алып, 1.4 кестеге сәйкес анықтайды.

1.4 кесте – Жаңғыш заттың құрамына байланысты жану үрдісінде түзілетін өнімдер

Жаңғыш зат құрамына кіретін элемент	Жану өнімі
көміртегі С	көміртегі оксиді (IV) CO_2
сутегі Н	су H_2O
күкірт S	күкірт оксиді (IV) SO_2
фосфор Р	фосфор оксиді (V) P_2O_5
кремний Si	кремний оксиді (IV) SiO_2
металл	металл оксиді
азот N	молекулярлы азот N_2
галогендер (F, Cl, Br, J)	галоген сутегі (HF, HCl, HBr, HI)
оттегі O	жану өнімдері құрамына ауысады

Жаңғыш зат құрамындағы сутегі атомдары галогенмен әрекеттесу кезінде галоген сутегі түзіледі. Егер галоген атомдары сутегі атомдарынан артық болса, онда молекулярлы галоген түзіледі.

Жаңғыш заттың құрамында болатын оттегі де, ауаның оттегісі сияқты, тотығу реакциясына қатысады. Осыған орай жану үшін ауаның қажеттілігі төмендейді.

5. Реакция теңдеуін құрастыру кезінде оның оң жақтағы коэффициенттерді келесі ретте қойылады: алдымен көміртегі моль сандары теңестіріледі, кейін күкірт, фосфор, кремний, галогендер, сутегі, ең соңында – оттегі мен азоттың моль сандары теңдеудің оң және сол жағында.

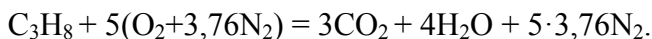
6. Стехиометриялық коэффициенті β есептелуін жеңілдету үшін (1.4) формуланы қолдануға болады.

Есеп шығару мысалы

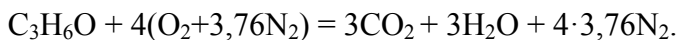
Органикалық заттардың негізгі класстарының ауада жану реакция теңдеуін құрастыру.

Шығару

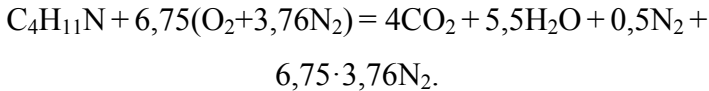
Көмірсутектер: пропанның ауада жануы:



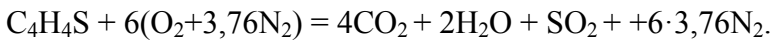
Құрамында оттегі бар қосылыстар: ацетонның ауада жануы:



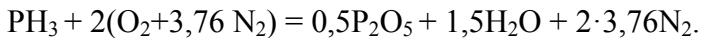
Құрамында азот бар қосылыстар: диэтиламиннің ауада жануы:



Құрамында күкірт бар қосылыстар: тиофеннің ауада жануы:



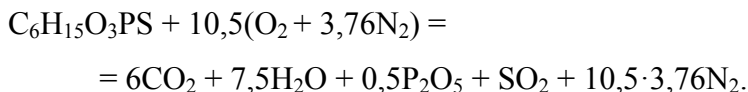
Құрамында фосфор бар қосылыстар: фосфорлы сутегінің ауада жануы:



Құрамында галоген бар қосылыстар: дихлорэтаннның ауада жануы:



Элементоорганикалық қосылыстар: үшэтилтио-
фосфаттың ауада жануы:



***Жаңғыш заттың стехиометриялық
концентрациясын есептеу әдістемесі***

1. Жану реакция теңдеуін құрастыру, жану реакцияның стехиометриялық коэффициенті β анықтау.

2. Егер реакция ауа ортасында жүрсе, (1.5) формула бойынша көлемдік стехиометриялық концентрацияны есептеу. Егер оттегі ортасында жүрсе, онда (1.6) формула бойынша есептеу.

3. (1.10) формула бойынша жаңғыш заттың молярлық массасын және берілген жаңдайларда газдың молярлық көлемін есептеу.

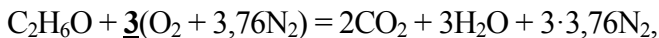
4. (1.8) формула бойынша массалық стехиометриялық концентрацияны есептеу.

Есеп шығару мысалы

Тұрақты жағдайларында ауамен этил спиртінің C_2H_6O қоспасында көлемдік және массалық стехиометриялық концентрациясын анықтау.

Шығару

1. Этил спирттің ауамен қоспадағы жану реакция теңдеуін құрастырамыз, стехиометриялық коэффициент β анықтаймыз:



$$\beta = \underline{3}.$$

2. (1.5) формула бойынша жаңғыш заттың ауамен қоспадағы көлемдік стехиометриялық концентрациясын есептейміз:

$$\varphi_{с\text{тм}} = \frac{100}{1 + 3 \cdot 4,76} = 6,54\%.$$

3. Жаңғыш заттың молярлық массасын анықтаймыз:

$$\mu_{гв} = n_C \cdot 12 + n_H \cdot 1 + n_O \cdot 16 = 2 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 1 \cdot 16 = 46$$

$$\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}.$$

1 тарау. Жану үрдісінің материалдық теңгерімі

4. Тұрақты жағдайларында газдың молярлық көлемі

$V_{\mu} = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$ тең екендігін есепке алып, массалық стехиометриялық концентрациясын анықтаймыз:

$$\Phi'_{\text{СТМ}} = \frac{1000 \cdot 46}{(1 + 3 \cdot 4,76) \cdot 24,4} = 123,3 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}.$$

Қорытынды: тұрақты жағдайларында этил спиртiнiң ауамен қоспадағы стехиометриялық концентрациясы 6,54 % немесе $123,3 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$.

§ 3. Жану үрдісінің материалдық теңгерімін есептеу

Жану реакцияның материалдық теңгерімін М.В. Ломоносовтың заттың масса сақталу заңына бағынады, яғни: реакцияға түскен заттардың массасы реакция нәтижесінде түзілген заттардың массасына тең келеді.

Материалдық теңгерімді есептеу жануға қажетті ауа шығынын, жану өнімдерінің көлемін және құрамын, жану температурасын, жарылыс температурасын, жарылыстың максималды қысымын, өрт температурасын, газ алмасу қарқындылығын және т.б. әртүрлі жағдайда өрт дамуын сипаттайтын параметрлерді анықтауға мүмкіндік береді [2], [3].

Көптеген тәжірибелік мәселелерді шешу кезінде жаңғыш заттың нақты масса немесе көлемінің толық жануына қажетті ауа көлемін, жану өнімдерінің көлемін және олардың пайыздық құрамын білу өте маңызды.

Жану өнімдері – бұл жану үрдісінде жаңғыш заттың тотықтырғышпен әрекеттесу нәтижесінде түзілетін газды, сұйық және қатты заттар.

Жану өнімдерінің құрамы жаңғыш заттың құрамына және жану реакцияның жүру шарттарына байланысты. Бастапқы қоспа құрамына кірген бейтарапты заттар да жану реакциясына қатыспаған жаңғыш заттың немесе тотырғыштың бір бөлігі жану өнімдеріне ауысады. Жану өнімдерінің барлығы түтін деп аталатын жүйені құрайды.

Түтін – бұл газды дисперсионды ортада таралған $10^5 \div 10^8$ г мөлшердегі қатты және сұйық бөлшектерден (дисперсті фаза) тұратын дисперсты жүйе.

Түтіннің тұнықсыздығын қатты және сұйық жану өнімдерінің болуымен байланысты. Улы және қауіпті алдын ала ыдырау өнімдері де тұнықсыз түтінге әкеледі. Статистика бойынша, өрт кезінде қаза болған адамдардың 70 % улы жану өнімдері мен заттардың термиялық ыдырау өнімдерімен улану нәтижесінде зардап шеккен.

Жаңғыш заттың толық тотығу кезінде *толық жану өнімдері* (H_2O , CO_2 , SO_2 және т.б.) түзіледі. Жаңғыш қоспа құрамында оттегі жеткіліксіз болғанда *толықсыз жану өнімдері* (C , CO , CH_4O) түзіледі. Толықсыз жану өнімдерінің құрамына термототығулық ыдырау (пиролиз) өнімдері кіреді. Бұл үрдіс жаңғыш заттардың өрт жалынымен немесе ыстық жану өнімдерімен сәулелену нәтижесінде пайда болады. Бұл жағдайда спирттер, альдегидтер, кетондар, HCl , HCN және т.б. түзілу мүмкін.

Толық жану өнімдерінің көптеген түрі *химиялық бейтарапты* заттар болып табылады және өрт жағдайында кейінгі химиялық айналымдарға қабілетті емес. Кейбір толық жану өнімдері реакцияларға қабілетті болады, яғни кейінгі реакцияларға түсуі мүмкін. Мысалы, HCl алмасу реакциясына қатысуы мүмкін, ал толықсыз жану өнімдері қоршаған ортаның жоғары температураларында ары қарай тотығуы мүмкін.

Түзілу кезінде жану өнімдерінің температурасы жоғары болады және олардың температуралық кеңеюі жүреді. Осы жағдайда жану өнімдерінің көлемін әмбебап газды заңынан анықтауға болады:

$$V_{\text{пг}}^{\text{Тгор}} = \frac{V_{\text{пг}}^{\text{То}} \text{Тгор} P_0}{T_0 P_{\text{пг}}}, \text{ м}^3. \quad (1.11)$$

Түтіннің қауіптілігі оның жоғары температурасымен, улылығымен, оттегінің төмен мөлшерде болуымен, тұнықсыздығымен, жабық бөлмелерде термототығулық ыдырау өнімдерін және жарылыс қауіпті қоспалардың ауамен толықсыз жану өнімдерін түзетін мүмкіндігімен байланысты.

Түтіннің қауіптілігін төмендету үшін судың таралған ағынын қолданады (температураны төмендету және түтінді тұндыру) және түтінді сору мен түтін шығару кеңістіктер арқылы түтінді жояды.

Материалдық теңгерімнің теориялық көрсеткішін анықтау үшін жаңғыш заттың жану реакция теңдеуін құрастырады (1.3). Оның негізінде жаңғыш заттың толық жануына қажетті ауа көлемін және жану өнімдерінің көлемін есептейді.

Жаңғыш заттың жануына жұмсалатын ауаның және жану өнімдерінің *салыстырмалы және толық, теориялық және нақты* мөлшерін айырады.

Салыстырмалы ауа көлемі жаңғыш заттың мөлшер бірлігінің (1 моль, 1 м³, 1 кг) жануына қажет.

Толық ауа көлемі берілген жаңғыш заттың жануына қажет.

Теориялық ауа көлемі – жаңғыш заттың толық жануына қажетті ауаның минималды көлемі.

Нақты ауа көлемі – бұл берілген жағдайда жаңғыш заттың жануына жіберілетін ауа мөлшері.

Реакция теңдеуі бойынша *ауаның салыстырмалы теориялық моль санын* анықтайды. Осындай мольдық ауа мөлшері 1 моль жаңғыш заттың толық жануына қажетті; оны реакция теңдеуі бойынша анықтайды:

$$n_{\text{B}}^0 = (1 + 3,76)\beta = 4,76\beta, \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1} \quad (1.12)$$

мұнда β – стехиометриялық коэффициент; 1 моль жаңғыш заттың толық жануына қажетті оттегі моль санын көрсетеді.

Жану өнімдерінің салыстырмалы теориялық моль саны жану реакция теңдеуінде барлық жану өнімдерінің моль қосындысына тең болады (1.3):

$$n_{\text{пр}}^0 = \sum_i n_{\text{пр}i}, \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (1.13)$$

Шынында, жану аумағына түсетін ауаның моль саны теориялық мөлшерімен сәйкес келмейді. 1 моль жаңғыш заттың жануына нақты түсетін ауа мөлшері *салыстырмалы нақты ауаның моль саны* деп аталады және n_B белгіленеді.

Жану үрдісінің ауамен қамтамасыз ету дәрежесін сипаттау үшін *артық ауаның коэффициенті* (α) түсінігін қолданады. Бұл коэффициент жану аумағына түсетін ауа мөлшерінің жаңғыш заттың толық жануына қажетті теориялық мөлшерінен нақты айырмашылығын көрсетеді:

$$\alpha = \frac{n_B}{n_B^0}, \quad (1.14)$$

мұнда n_B^0 – 1 моль жаңғыш заттың толық жануына қажетті салыстырмалы теориялық ауаның моль саны;

n_B – 1 моль жаңғыш заттың жану кезінде жану аумағына нақты түсетін ауаның салыстырмалы нақты моль саны.

Осыған орай, салыстырмалы нақты ауаның моль саны келесідей анықталады:

$$n_B = n_B^0 \cdot \alpha, \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (1.15)$$

Жануға нақты жұмсалатын ауа мөлшері және теориялық қажетті мөлшері арасындағы айырмашылық *артық ауа* деп аталады:

$$\Delta n_{\mathbf{B}} = n_{\mathbf{B}} - n_{\mathbf{B}}^0 = n_{\mathbf{B}}^0(\alpha - 1), \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (1.16)$$

Бұл жану кезінде шығындалмайтын және жану өнімдеріне ауысатын ауа мөлшері. Нақты салыстырмалы жану өнімдерінің моль саны теориялықтан артық ауа мөлшеріне сәйкес көп болады:

$$\begin{aligned} n_{\text{пг}} &= n_{\text{пг}}^0 + \Delta n_{\mathbf{B}}, \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}; \\ \text{немесе} \quad n_{\text{пг}} &= n_{\text{пг}}^0 + n_{\mathbf{B}}^0(\alpha - 1), \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \end{aligned} \quad (1.17)$$

Артық ауаның болуы жану өнімдерінде реакцияға қатыспаған оттегі мен азоттың болуына әсер етеді. Бұл заттар жану өнімдерінің құрамына ауысады. Әрбір компоненттің жану өнімдеріндегі мөлшерін келесі формулалар бойынша анықтауға болады:

$$\varphi_{\text{пг}i} = 100 \frac{n_{\text{пг}i}}{n_{\text{пг}}}, \%; \quad (1.18)$$

$$\varphi_{O_2} = 100 \frac{(\alpha - 1)\beta}{n_{\text{пр}}}, \%; \quad (1.19)$$

$$\varphi_{N_2} = 100 \frac{\alpha \cdot 3,76\beta}{n_{\text{пр}}}, \%. \quad (1.20)$$

Жану үрдісінің материалдық теңгерімін есептеу жану реакция негізінде жүргізіледі және 1 моль жаңғыш заттың жануына қажетті ауа моль санын және жану өнімдерінің моль санын анықтауға байланысты.

Тәжірибе жүзінде жаңғыш зат газ болса, заттың мөлшерін моль санымен емес, м^3 арқылы өлшейді. Егер жаңғыш зат конденсацияланған болса (сұйықтық немесе қатты зат), онда кг өлшейді. Сондықтан, жану үрдісінің материалдық теңгерімін есептеу кезінде жаңғыш заттың агрегаттық күйін есепке алу қажет. Берілген температура T мен қысымда P 1 кмоль газ (1.10) формула бойынша есептелетін көлемді V_{μ} , м^3 алатынын ұмытпау керек.

Егер $V_{\mu}^{\text{ГВ}}$, м^3 , көлем алатын 1 кмоль жаңғыш зат жанса, онда оның жануына ауаның $n_{\text{в}}^0 V_{\mu}^{\text{В}}$, м^3 теориялық көлемі шығындалады. Сонда 1м^3 жаңғыш заттың толық жануына ауаның салыстырмалы теориялық көлемін келесі пропорция арқылы анықтауға болады:

1 тарау. Жану үрдісінің материалдық теңгерімі

$$V_{\mu}^{ГВ} \text{ м}^3 \text{ ГР} \rightarrow n_{\mathbf{B}}^0 V_{\mu}^{\mathbf{B}} = 4,76\beta V_{\mu}^{\mathbf{B}} \text{ м}^3 \text{ воздуха,}$$

$$1 \text{ м}^3 \text{ ГР} \rightarrow v_{\mathbf{B}}^0 \text{ м}^3 \text{ воздуха.}$$

$$v_{\mathbf{B}}^0 = \frac{4,76 \cdot \beta \cdot V_{\mu}^{\mathbf{B}}}{V_{\mu}^{ГВ}}, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}. \quad (1.21)$$

Егер жаңғыш зат ауаның жағдайларда болса, онда $V_{\mu}^{ГВ} = V_{\mu}^{\mathbf{B}}$. Онда 1 м^3 газ немесе будың жану шартында салыстырмалы теориялық және нақты көлемдерді есептеу кезінде олар сәйкес моль сандарына тең келеді:

$$v_{\mathbf{B}}^0 = 4,76\beta, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}; \quad (1.22)$$

$$v_{\mathbf{B}} = \alpha v_{\mathbf{B}}^0, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}. \quad (1.23)$$

Егер жаңғыш зат пен жану өнімдері бірдей жағдайларда болса, олардың салыстырмалы көлемдерін де есептейді:

$$v_{\PiГ}^0 = \sum_i n_{\PiГ i}^0, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}; \quad (1.24)$$

$$v_{\PiГ} = v_{\PiГ}^0 + (\alpha - 1)v_{\mathbf{B}}^0, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}. \quad (1.25)$$

Толық ауа көлемі мен жану өнімдердің көлемдерін жанып кеткен газдың көлеміне $V_{гг}$ олардың салыстырмалы көлемдерінің көбейтіндісі арқылы анықтайды:

$$V_{\mathbf{B}} = v_{\mathbf{B}} V_{гг}, \text{ м}^3; \quad (1.26)$$

$$V_{гг} = v_{гг} V_{\mathbf{B}}, \text{ м}^3. \quad (1.27)$$

Сұйық немесе қатты агрегаттық күйінде болатын заттардың гомогенді жану шартында, бұл заттардың алдын ала газды фазасына айналуы жүреді.

Салмағы μ кг болатын 1 киломоль конденсацияланған жаңғыш заттың жану кезінде $n_{\mathbf{B}}^0 V_{\mu}^{\mathbf{B}}, \text{ м}^3$ тең болатын теориялық ауа көлемі шығындалады. Онда 1 кг жаңғыш заттың жануына қажетті салыстырмалы теориялық ауа көлемін келесі пропорция арқылы анықтайды:

$$\mu \text{ кг ГВ} \rightarrow n_{\mathbf{B}}^0 \cdot V_{\mu}^{\mathbf{B}} = 4,76\beta V_{\mu}^{\mathbf{B}} \text{ м}^3 \text{ воздуха,}$$

$$1 \text{ кг ГВ} \rightarrow v_{\mathbf{B}}^0 \text{ м}^3 \text{ воздуха,}$$

$$v_{\mathbf{B}}^0 = n_{\mathbf{B}}^0 \frac{V_{\mu}^{\mathbf{B}}}{\mu_{ГВ}}, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}. \quad (1.28)$$

Жану өнімдерінің салыстырмалы теориялық көлемін де есептеуге болады:

$$\mathbf{v}_{\Pi\Gamma}^0 = \frac{V_{\mu}^{\Pi\Gamma}}{\mu_{\Gamma\mathbf{B}}} \sum_i \mathbf{n}_{\Pi\Gamma}, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}, \quad (1.29)$$

(1.23) және (1.25) формулаларына сәйкес жану өнімдердің және ауаның нақты көлемдерін анықтауға болады:

$$\mathbf{v}_{\mathbf{B}} = \alpha \cdot \mathbf{v}_{\mathbf{B}}^0, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1},$$
$$\mathbf{v}_{\Pi\Gamma} = \mathbf{v}_{\Pi\Gamma}^0 + (\alpha - 1)\mathbf{v}_{\mathbf{B}}^0, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

Жану өнімдері мен ауаның толық көлемдерін анықтау үшін жанып кеткен заттың массасын салыстырмалы көлемдерді көбейту керек:

$$V_{\mathbf{B}} = v_{\mathbf{B}} m_{\Gamma\mathbf{B}}, \text{ м}^3, \quad (1.30)$$

$$V_{\Pi\Gamma} = v_{\Pi\Gamma} m_{\Gamma\mathbf{B}}, \text{ м}^3, \quad (1.31)$$

мұнда $m_{\Gamma\mathbf{B}}$ – жанып кеткен заттың массасы, кг.

Материалдық теңгерімді есептеудің тәжірибелік маңызы

Материалдық теңгерімді есептеу әртүрлі жағдайларда жүретін өрт дамуын сипаттайтын жануға қажетті ауа шығынын, жану өнімдерінің құрамы мен көлемін, жану температурасын, жарылыс температурасын, жарылыстың максималды қысымын, өрт температурасын, газ алмасу қарқындылығын және т.б. параметрлерді анықтауға мүмкіндік береді.

§ 3.1 Жеке заттың жану үрдісінің материалдық теңгерімін есептеу

Жеке заттың жану үрдісінің материалдық теңгерімін есептеу әдістемесі

1. Жану реакция теңдеуін құрастыру (1.3), стехиометриялық коэффициент β анықтау (1.4).

2. (1.12) формула бойынша ауаның салыстырмалы теориялық моль санын есептеу.

3. (1.13) формула бойынша жану өнімдерінің салыстырмалы теориялық моль санын есептеу.

4. Жану ауаның артықшылығымен жүрген кезде ауа мен жану өнімдерінің нақты салыстырмалы моль сандарын (1.15), (1.17) формулалары бойынша есептеу.

5. Жану өнімдерінің құрамын пайыз мөлшерімен (1.15)–(1.17) формулалары бойынша есептеу.

6. Жаңғыш заттың агрегаттық күйіне байланысты ауа мен жану өнімдерінің салыстырмалы теориялық көлемдерін есептеу.

6.1. Егер жаңғыш зат газ болса, онда есептеуді (1.22) және (1.24) формулалары бойынша жүргізу.

6.2. Егер жаңғыш зат қатты немесе сұйық күйде болса, онда есептеуді (1.28) және (1.29) формулалары бойынша жүргізу.

7. Ауа мен жану өнімдерінің нақты көлемдерін (1.23) және (1.25) формулалары бойынша есептеу.

8. Ауа мен жану өнімдерінің толық көлемдерін (1.26) және (1.27) немесе (1.30) және (1.31) формулалары бойынша есептеу.

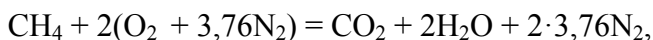
9. Жану температурасында жану өнімдерінің көлемін $V_{\text{II}}^{\text{T}_{\text{гор}}}$ (1.11) формула бойынша есептеу.

Есеп шығару мысалы

Жану үрдісі қалыпты жағдайларда ауаның артық коэффициенті $\alpha = 1,2$ және жану өнімдерінің температурасы - 2200 К болатын шартында 10 м^3 метанның CH_4 жану кезіндегі ауа көлемін, жану өнімдерінің көлемі мен құрамын есептеу.

Шығару

1. Жану реакция теңдеуін құрастырамыз:



$$\beta = 2.$$

2. Ауаның салыстырмалы теориялық моль санын анықтаймыз:

$$n_{\text{B}}^0 = 4,76\beta = 4,76 \cdot 2 = 9,52 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Жану өнімдерінің салыстырмалы теориялық моль сандарын есептейміз:

$$\begin{aligned}n_{\text{пр}}^0 &= n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + \beta \cdot 3,76_{\text{N}_2} = \\ &= 1 + 2 + 2 \cdot 3,76 = 10,52 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.\end{aligned}$$

4. Ауаның артық мөлшерін ескеріп, ауа мен жану өнімдерінің нақты көлемдерін анықтаймыз:

$$n_{\text{в}} = 1,2 \cdot 9,52 = 11,42 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$n_{\text{пр}} = 10,52 + (1,2 - 1) \cdot 9,52 = 12,42 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

5. Жану өнімдерінің құрамын пайыздық мөлшерін анықтаймыз:

$$\varphi_{\text{CO}_2} = 100 \frac{1}{12,42} = 8,05\%;$$

$$\varphi_{\text{H}_2\text{O}} = 100 \frac{2}{12,42} = 16,1\%;$$

$$\varphi_{\text{O}_2} = \frac{(1,2 - 1) \cdot 2 \cdot 100}{12,42} = 3,21\%;$$

$$\varphi_{\text{N}_2} = \frac{1,2 \cdot 2 \cdot 3,76 \cdot 100}{12,42} = 72,64\%.$$

6. Жаңғыш зат газ болғандықтан, ауа мен жану өнімдерінің салыстырмалы теориялық көлемдерін (1.22) және (1.24) формулалары бойынша есептейміз:

$$v_B^0 = 9,52 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3};$$
$$v_{\text{нr}}^0 = 10,52 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

7. Ауаның артық мөлшері коэффициентін ескере отырып, ауа мен жану өнімдерінің салыстырмалы нақты көлемдерін (1.23) және (1.25) формулалары бойынша есептейміз:

$$v_B = 11,42 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3};$$
$$v_{\text{нr}} = 12,42 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

8. Ауа мен жану өнімдерінің толық көлемдерін анықтаймыз:

$$V_B = v_B V_{\text{ГT}} = 11,42 \cdot 10 = 114,2 \text{ м}^3;$$
$$V_{\text{нr}} = v_{\text{нr}} V_{\text{ГT}} = 12,42 \cdot 10 = 124,2 \text{ м}^3.$$

9. Жану температурасында жану өнімдерінің көлемін анықтаймыз:

$$V_{\text{иг}}^{\text{T}_{\text{гор}}} = \frac{124,2 \cdot 2200 \cdot 101,3}{273 \cdot 101,3} = 1000,9 \text{ м}^3.$$

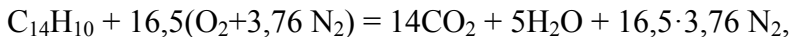
Қорытынды: 10 м³ метанның жануына қалыпты жағдайда 114,2 м³ ауа көлемі қажет, 2200 К температурада жану өнімдерінің көлемі 1000,9 м³ құрайды. Жану өнімдерінің құрамы: CO₂ – 8,05 %; H₂O – 16,1 %; O₂ - 3,2 %; N₂ – 72,64 %.

Есеп шығару мысалы

2кг нафталиннің C₁₄H₁₀ жану кезінде ауаның, жану өнімдерінің көлемін және CO₂ пайыздық мөлшерін анықтаңыз. Егер жану қоршаған орта температурасы 10 °С, ауаның қысымы 100,0 кПа; артық ауа коэффициенті α = 1,8, жану өнімдердің температурасы 900 °С құрайтын болса.

Шығару

1. Жану реакцияның теңдеуін жазамыз:



$$\beta = 16,5.$$

1 тарау. Жану үрдісінің материалдық теңгерімі

2. (1.12) формула бойынша ауаның салыстырмалы теориялық моль санын анықтаймыз:

$$n_{\text{в}}^0 = 4,76 \cdot 16,5 = 78,54 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. (1.13) формула бойынша жану өнімдердің салыстырмалы теориялық моль санын анықтаймыз:

$$\begin{aligned} n_{\text{пт}}^0 &= n\text{CO}_2 + n\text{H}_2\text{O} + \beta \cdot 3,76\text{N}_2 = \\ &= 14 + 5 + 16,5 \cdot 3,76 = 81,0 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \end{aligned}$$

4. (1.15), (1.17) формулалар бойынша ауа мен жану өнімдердің нақты көлемдерін есептейміз:

$$\begin{aligned} n_{\text{в}} &= \alpha \cdot n_{\text{в}}^0 = 1,8 \cdot 78,54 = 141,4 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}; \\ n_{\text{пт}} &= 81,04 + (1,8 - 1) \cdot 78,54 = 143,9 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \end{aligned}$$

5. Жану өнімдер құрамында CO_2 пайыздық мөлшерін анықтаймыз:

$$\varphi_{\text{CO}_2} = 100 \frac{14}{143,9} = 9,7 \%$$

6. Жаңғыш зат қатты күйінде болғандықтан, ауа мен жану өнімдердің салыстырмалы теориялық көлемдерін (1.28) және (1.29) формулалар есептейміз. Алдын ала берілген жағдайларда нафталиннің молярлық массасы мен молярлық көлемін анықтаймыз (формула (1.10):

$$\mu_{\text{ГВ}} = 14 \cdot 12 + 10 \cdot 1 = 178 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1},$$

$$V_{\mu} = \frac{101,3 \cdot 22,4 \cdot (273 + 10)}{100,0 \cdot 273} = 23,53 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}.$$

$$v_{\text{В}}^0 = \frac{4,76 \cdot 16,5 \cdot 23,53}{178} = 10,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1};$$

$$v_{\text{ПГ}}^0 = \frac{(14 + 5 + 16,5 \cdot 3,76) \cdot 23,53}{178} = 10,7 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

7. (1.23) және (1.25) формулаларына сәйкес артық ауа коэффициентін ескеріп, ауа мен жану өнімдердің салыстырмалы нақты көлемдерін анықтаймыз:

$$v_{\mathbf{B}} = 1,8 \cdot 10,4 = 18,7 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1};$$

$$v_{\text{пг}} = 10,7 + (1,8 - 1) \cdot 10,4 = 19,0 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

8. Берілген жағдайларда ауа $V_{\mathbf{B}}$ мен жану өнімдердің $V_{\text{пг}}$ толық көлемдерін есептейміз:

$$V_{\mathbf{B}} = 18,7 \cdot 2 = 37,4 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{пг}} = 19,0 \cdot 2 = 38,0 \text{ м}^3.$$

9. Жану температурасында жану өнімдердің көлемін анықтаймыз:

$$V_{\text{пг}}^{\text{T}_{\text{гор}}} = \frac{38,0 \cdot (273 + 900)}{(273 + 10)} = 157,6 \text{ м}^3.$$

Қорытынды: берілген жағдайларда 2кг нафталиннің жануына $37,4 \text{ м}^3$ ауа қажет және жану өнімдердің көлемі $157,6 \text{ м}^3$ құрайды, ал оның құрамындағы CO_2 мөлшері 9,7 % алады.

§ 3.2 Күрделі заттар мен материалдардың жану үрдісінің материалдық теңгерімін есептеу

§ 3.2.1. Газ қоспасының жануы

Газ қоспасының жану үрдісінің материалдық теңгерімін есептеу кезінде алдымен қоспаның құрамындағы жеке жаңғыш компоненті үшін ауа мен жану өнімдердің көлемін анықтайды. Кейін компоненттердің пайыздық мөлшеріне сәйкес газ қоспасына ауа мен жану өнімдердің көлемдерін есептейді.

Құрамы белгілі газ қоспасының толық жануына қажетті ауаның салыстырмалы теориялық көлемін келесі формула бойынша анықтайды:

$$v_{\mathbf{B}}^{\mathbf{0}} = \frac{\sum \beta_i \varphi_i - \varphi_{\mathbf{O}_2}}{21}, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}, \quad (1.32)$$

мұнда: φ_i – қоспаның құрамындағы i жаңғыш компонентінің пайыздық мөлшері, %;

β_i – i жаңғыш компонентінің жану реакциясындағы стехиометриялық коэффициенті;

φ_{O_2} – бастапқы қоспа құрамында оттегінің мөлшері, %.

Газ қоспаның жану кезінде түзілетін жану өнімдердің құрамы мен көлемін анықтау үшін қоспа құрамындағы жеке жаңғыш компонентінің жану реакциясы бойынша жану өнімдердің құрамы мен көлемін анықтау керек. Сонда жану өнімдердің салыстырмалы теориялық көлемін газ қоспаның жану өнімдердің салыстырмалы көлемдерінің қосындысы түрінде келесі формула бойынша анықтайды:

$$v_{\text{пг}}^0 = \sum_{i=1}^n v_{\text{пг}i}^0 \cdot r_i, \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}, \quad (1.33)$$

мұнда $r_i = \frac{\varphi_i}{100}$ – қоспа құрамында i жаңғыш

компоненттің көлемдік бөлігі;

$v_{\text{пг}i}^0$ – қоспа құрамындағы жеке жаңғыш компонентінің жану кезінде түзілетін i жану өнімінің салыстырмалы теориялық көлемі.

Жаңғыш газдардың күрделі қоспасының материалдық теңгерімін есептеулерді жеңілдету үшін 1.5 кестеде жеке

1 тарау. Жану үрдісінің материалдық теңгерімі
 жаңғыш газдарға есептелген жану өнімдердің салыстырмалы
 көлемдері көрсетілген. Бұл мәндер жану реакциясында
 олардың стехиометриялық коэффициенттеріне сәйкес келеді.

1.5 кесте – Кейбір газдардың жану өнімдерінің
 салыстырмалы көлемдері

Газ		Жану өнімнің көлемі, $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$			
атауы	формуласы	CO_2	H_2O	N_2	SO_2
сутегі	H_2	–	1,0	1,88	–
көміртегі (II) оксиді	CO	1,0	–	1,88	–
күкірт сутегі	H_2S	–	1,0	5,64	1,0
метан	CH_4	1,0	2,0	7,52	–
ацетилен	C_2H_2	2,0	1,0	9,40	–
этан	C_2H_6	2,0	3,0	13,16	–
этилен	C_2H_4	2,0	2,0	11,28	–
пропан	C_3H_8	3,0	4,0	18,80	–
бутан	C_4H_{10}	4,0	5,0	24,40	–
пентан	C_5H_{12}	5,0	6,0	30,08	–

***Газ қоспаның толық жану шартында ауа мен жану
 өнімдердің көлемін анықтау әдістемесі***

1. Газ қоспаның құрамына кіретін жеке жаңғыш
 компоненттің әрқайсына жеке жану реакциясын құрастыру
 және стехиометриялық коэффициентті анықтау.

2. (1.32) формула бойынша газ қоспаның толық жануына қажетті салыстырмалы теориялық ауа көлемін есептеу.

3. (1.23) формула бойынша артық ауа коэффициентін ескертіп, салыстырмалы нақты ауа көлемін есептеу.

4. (1.26) формула бойынша газ қоспаның берілген көлемі жану шартында жұмсалатын толық нақты ауа көлемін анықтау.

5. Кейінгі есептеулерді жеңілдету үшін бастапқы газды қоспа компоненттерінің көлемдік бөліктерін негізге алып, жану өнімдердің салыстырмалы көлемдерін анықтау үшін кесте құрастыру.

6. (1.33) формула бойынша газды қоспаның жану шартында жану өнімдердің салыстырмалы теориялық көлемін анықтау.

7. (1.25, 1.27) формулалар бойынша артық ауа коэффициентін ескертіп, жану өнімдердің салыстырмалы және толық нақты көлемдерін анықтау.

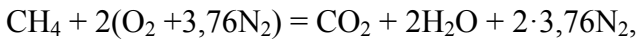
8. (1.11) формула бойынша берілген жағдайларда жану өнімдердің көлемін есептеу.

Есеп шығару мысалы

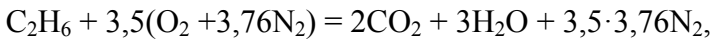
Құрамы берілген 10 м^3 газ қоспаның жану кезінде түзілетін жану өнімдердің және ауаның көлемдерін анықтаңыз: метан CH_4 - 58 %, этан C_2H_6 - 7,2 %, пропан C_3H_8 - 5,8 %, бутан C_4H_{10} - 7,0 %, пентан C_5H_{12} - 8,5 %, көміртегі (IV) оксиді CO_2 - 3 %, азот N_2 - 10,5 %. Жану артық ауа коэффициенті $\alpha = 1,7$ өтеді; жану температурасы $1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Шығару

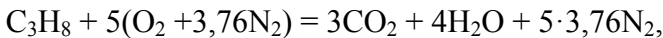
1. Газ қоспаның құрамына кіретін жеке жаңғыш компоненттің әрқайсына жеке жану реакциясын құрастырамыз және стехиометриялық коэффициентін анықтаймыз:



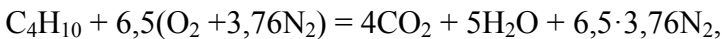
$$\beta_{\text{CH}_4} = 2;$$



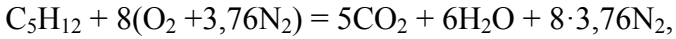
$$\beta_{\text{C}_2\text{H}_6} = 3,5;$$



$$\beta_{\text{C}_3\text{H}_8} = 5;$$



$$\beta_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 6,5;$$



$$\beta_{\text{C}_5\text{H}_{12}} = 8.$$

2. Газ қоспаның толық жануына қажетті салыстырмалы теориялық ауа көлемін есептейміз:

$$v_{\text{B}}^0 = \frac{(2 \cdot 5,8 + 3,5 \cdot 7,2 + 5 \cdot 5,8 + 6,5 \cdot 7 + 8 \cdot 5,8)}{21} = 12,5 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Артық ауа коэффициентін ескеріп, салыстырмалы нақты ауа көлемін есептейміз:

$$v_{\text{B}} = 1,7 \cdot 12,5 = 21,25 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

4. Газ қоспаның берілген көлемі жану шартында жұмсалатын толық нақты ауа көлемін анықтаймыз:

$$V_{\text{B}} = 21,25 \cdot 10 = 212,5 \text{ м}^3.$$

5. Бастапқы газды қоспа компоненттерінің көлемдік бөліктерін негізге алып, жану өнімдердің салыстырмалы көлемдерін анықтау үшін кесте құрастырамыз.

1 тарау. Жану үрдісінің материалдық теңгерімі

Қоспа компоненті	Көлемдік бөлігі, r_i	Жану өнімдердің көлемі, $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$		
		CO_2	H_2O	N_2
метан CH_4	0,58	$0,58 \cdot 1$	$0,58 \cdot 2$	$0,58 \cdot 7,52$
этан C_2H_6	0,072	$0,072 \cdot 2$	$0,072 \cdot 3$	$0,072 \cdot 13,16$
пропан C_3H_8	0,058	$0,058 \cdot 3$	$0,058 \cdot 4$	$0,058 \cdot 18,8$
бутан C_4H_{10}	0,07	$0,07 \cdot 4$	$0,07 \cdot 5$	$0,07 \cdot 24,4$
пентан C_5H_{12}	0,085	$0,085 \cdot 5$	$0,085 \cdot 6$	$0,085 \cdot 30,08$
көміртегі (IV) оксиді CO_2	0,03	0,03	–	–
азот N_2	0,105		–	0,105
Барлығы	1,0	1,6	2,5	10,8

6. Газды қоспаның жану шартында жану өнімдердің салыстырмалы теориялық көлемін анықтау:

$$v_{\text{пт}}^0 = 1,6 + 2,5 + 10,8 = 14,9 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

7. Артық ауа коэффициентін ескеріп, қалыпты жағдайда берілген газды қоспаның 10 м^3 көлемінің жану өнімдердің салыстырмалы және толық нақты көлемдерін анықтаймыз:

$$v_{\text{пт}} = 14,9 + (1,7 - 1) \cdot 12,5 = 23,65 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3},$$

$$V_{\text{пт}} = 23,65 \cdot 10 = 236,5 \text{ м}^3.$$

8. Берілген жағдайларда жану өнімдердің көлемін есептейміз:

$$V_{\text{пр}} = \frac{236,5 \cdot 101,3 \cdot (1000 + 273)}{273 \cdot 101,3} = 1102,8 \text{ м}^3.$$

Қорытынды: 10 м³ газ қоспаның берілген жағдайларда жану кезінде 212,5 м³ ауа қажет; жану өнімдердің көлемі 1102,8 м³ құрайды.

§ 3.2.2. Күрделі конденсацияланған

материалдардың жануы

Күрделі конденсацияланған материал – бұл химиялық формуламен көрсетілмейтін химиялық құрамы бар сұйық және қатты күйіндегі заттардың қоспасы. Бұл ағаш, торф, мұнай мен мұнай өнімдері және сол сияқты т.б. заттар. Осындай заттардың құрамын химиялық элементтердің массалық немесе пайыздық бөліктерімен сипатталады.

Элементтік құрамы белгілі материалдың толық жануына қажетті теориялық ауа көлемін келесі формуламен анықталады:

$$v_{\mathbf{B}}^{\mathbf{O}} = \frac{4,76V_{\mu}}{100} \left(\sum_i \frac{\varphi_i \beta_i}{\mu_i} - \frac{\varphi_{\mathbf{O}}}{32} \right), \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}, \quad (1.34)$$

мұнда φ_i , $\varphi_{\mathbf{O}}$ – материалдың құрамындағы i жаңғыш компоненттің және оттегінің массалық пайыздық мөлшері, %;

β_i – материалдың құрамындағы i жаңғыш компоненттің жану реакциясындағы стехиометриялық коэффициенті;

μ_i – материалдың құрамындағы i химиялық элементтің молекулярлық массасы, $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$;

V_{μ} – берілген жағдайларда газдың киломоль көлемі, $\text{м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$, [1.28] формула бойынша анықталады.

Егер жаңғыш қоспа қалыпты жағдайларда ($V_{\mu} = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$) және құрамында тек көміртегі, сутегі, оттегі мен күкірт болса, онда (1.34) формула келесі түрде қолданады:

$$\begin{aligned} v_{\mathbf{B}}^{\mathbf{O}} &= \frac{4,76V_{\mu}}{4 \cdot 100} \left(\frac{\varphi_{\mathbf{C}}}{3} + \varphi_{\mathbf{H}} - \frac{\varphi_{\mathbf{O}} - \varphi_{\mathbf{S}}}{8} \right) = \\ &= 0,29 \left(\frac{\varphi_{\mathbf{C}}}{3} + \varphi_{\mathbf{H}} - \frac{\varphi_{\mathbf{O}} - \varphi_{\mathbf{S}}}{8} \right), \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}. \end{aligned} \quad (1.35)$$

Күрделі конденсацияланған материалдың жану өнімдердің көлемін есептеуді оның құрамына кіретін әрбір элементтің жану кезінде пайда болатын жану өнімдердің көлемін анықтау арқылы жүргізеді. Күрделі материал жану өнімдердің салыстырмалы теориялық көлемі әрбір химиялық элементтің жану өнімдердің салыстырмалы көлемдерінің қосындысы ретінде келесі формула бойынша анықтайды:

$$v_{\text{пт}}^0 = \sum_i v_{\text{пт}i}^0 \cdot g_i, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}, \quad (1.36)$$

мұнда $g_i = \frac{\Phi_i}{100}$ – материалдың құрамындағы i

химиялық элементтің массалық үлесі;

$v_{\text{пт}i}^0$ – материалдың құрамындағы i химиялық элементтің жану кезінде түзілетін жану өнімдердің салыстырмалы теориялық көлемі, $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$, әрбір химиялық элементтің жану реакциясы бойынша келесі формула бойынша анықтайды:

$$v_{\text{пт}i}^0 = \frac{V_{\mu}}{\mu_i} \beta_i, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}. \quad (1.37)$$

Құрделі материалдардың материалдық теңгерімін есептеуді жеңілдету үшін 1.6 кестеде жеке химиялық элементтердің жану кезінде пайда болатын жану өнімдердің қалыпты және тұрақты жағдайларындағы салыстырмалы көлемдер мәндері келтірілген.

1.6 кесте – Қалыпты және тұрақты жағдайларында кейбір элементтердің жану өнімдердің салыстырмалы көлемдері

Жаңғыш материалдың элементі	Жану өнімдердің көлемі*, м ³ ·кг ⁻¹			
	CO ₂	H ₂ O	N ₂	SO ₂
көміртегі С	1,87(2,03)*	–	7,0(7,65)*	–
сутегі Н	–	11,2(12,2)*	21,1(22,9)*	–
күкірт S	–	–	2,63(2,87)*	0,7(0,76)*
азот N	–	–	0,8(0,87)*	–
оттегі O	–		-2,63 (-2,87)*	
ылғал W	–	1,24(1,36)*		

*) жақшада – тұрақты жағдайда жану өнімдердің көлемі.

Күрделі материалдардың жану өнімдердің

көлемдерін анықтау әдістемесі

8. (1.34) формула бойынша элементтік құрамы берілген материалдың толық жануына қажетті салыстырмалы теориялық ауа көлемін есептеу; егер материал құрамындағы химиялық элементтің мөлшері берілмесе, онда ол (1.2) сәйкес химиялық формуламен анықталады.

9. (1.23) формула бойынша артық ауа коэффициентін ескеріп, салыстырмалы нақты ауа көлемін есептеу.

10. (1.30) формула бойынша материалдың берілген мөлшерінің жануына жұмсалатын толық нақты ауа көлемін анықтау.

11. Кейінгі есептеулерді жеңілдету үшін (1.36) формула бойынша есептелген коэффициенттер арқылы немесе 1.6 кестеде келтірілген (қалыпты немесе тұрақты жағдайларында) коэффициенттер көмегімен жаңғыш заттың элементтік құрамын негізінде жану өнімдердің салыстырмалы көлемдерін анықтау үшін кесте құрастыру.

12. (1.36) формула бойынша элементтік құрамы белгілі жаңғыш заттың жану өнімдерінің салыстырмалы теориялық көлемін есептеу.

13. (1.31) формула бойынша артық ауа коэффициентін ескеріп, жану өнімдердің толық нақты көлемдерін анықтау.

14. (1.11) формула бойынша жану температурасында жану өнімдердің көлемін анықтау.

Есептер шығару мысалы

Құрамы: С – 57,9 мас. %; Н – 5,3 мас. %; О – 29,7 мас. %; S – 1,1 мас. %; ылғалдығы W – 6 мас. % болатын 5кг торфтың ауа мен жану өнімдердің, су буының салыстырмалы және толық көлемдерін анықтаңыз. Жану қалыпты жағдайында, артық ауа коэффициенті $\alpha = 1,5$, жану өнімдердің температурасы 950 °С.

Шығару

1. (1.34) формула бойынша торфтың толық жануына қажетті салыстырмалы теориялық ауа көлемін есептейміз:

$$v_{\text{B}}^0 = \frac{4,76 \cdot 22,4}{4 \cdot 100} \cdot \left(\frac{57,9}{3} + 5,3 - \frac{29,7 - 1,1}{8} \right) = 5,6 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

2. Ауаның салыстырмалы нақты көлемін анықтаймыз:

$$v_{\text{B}} = 1,5 \cdot 5,6 = 8,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

3. Ауаның толық нақты көлемін анықтаймыз:

$$V_B = 8,4 \cdot 5 = 42 \text{ м}^3.$$

4. Жаңғыш зат құрамындағы элементтердің массалық үлесі және 1.6 кестедегі коэффициенттер бойынша қалыпты жағдайдағы жану өнімдердің салыстырмалы теориялық көлемін анықтаймыз. Кесте құрастырамыз.

Зат құрамындағы элементтер	Массалық үлес	Жану өнімдердің көлемі, $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$			
		CO_2	H_2O	SO_2	N_2
көміртегі С	0,579	$0,579 \cdot 1,87$	–	–	$0,579 \cdot 7,0$
сутегі Н	0,053	–	$0,053 \cdot 11,2$	–	$0,053 \cdot 21,1$
күкірт S	0,011	–	–	$0,011 \cdot 0,7$	$0,011 \cdot 2,63$
оттегі О	0,297	–	–	–	$-0,297 \cdot 2,63$
ылғал W	0,06	–	$0,06 \cdot 1,24$	–	–
Барлығы	1,0	1,08	0,67	$7,7 \cdot 10^{-3}$	4,42

5. Жану өнімдердің салыстырмалы теориялық көлемін анықтаймыз:

$$v_{\text{шт}}^0 = 1,08 + 0,67 + 7,7 \cdot 10^{-3} + 4,42 = 6,2 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

6. Жану өнімдердің салыстырмалы және толық нақты көлемдерін анықтаймыз:

$$v_{\text{пг}} = 6,2 + (1,5 - 1) \cdot 5,6 = 9,0 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1},$$

$$V_{\text{пг}} = 9,0 \cdot 5 = 45 \text{ м}^3.$$

7. Жану температурасында жану өнімдердің көлемін есептейміз:

$$V_{\text{пг}}^{\text{T}_{\text{гор}}} = \frac{45 \cdot 101,3 \cdot (950 + 273)}{273 \cdot 101,3} = 201,6 \text{ м}^3.$$

8. (1.18) формула арқылы жану өнімдердің судың салыстырмалы көлемі бойынша су буының мөлшерін анықтаймыз:

$$\varphi_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,67 \cdot 100}{9} = 7,4\%.$$

Қорытынды: 5 кг торфтың жану кезінде 42,0 м³ ауа шығындалады және 201,6 м³ жану өнімдер бөлінеді. Жану өнімдердің температурасы 950 °С; жану өнімдердің құрамында су буының мөлшері – 7,4 % құрайды.

БАҚЫЛАУҒА АРНАЛҒАН ТАПСЫРМАЛАР

1. Кестеде келтірілген заттардың ауада жану реакция теңдеуін құрастырыңыз.

№	Зат	Формула	№	Зат	Формула
1.	көміртегі метан глицерин анилин хлорлы этил	C CH ₄ C ₃ H ₈ O ₃ C ₆ H ₇ N C ₂ H ₅ Cl	7.	натрий октан диэтил эфирі гексамидин күкіртті көміртегі	Na C ₈ H ₁₈ C ₄ H ₁₀ O C ₁₂ H ₁₄ O ₂ N ₂ CS ₂
2.	күкірт этан амилацетат үшнитротолуол дифторэтан	S C ₂ H ₆ C ₇ H ₁₄ O ₂ C ₇ H ₅ O ₆ N ₃ C ₂ H ₄ F ₂	8.	кальций гексан пропанол никотин диметилфосфат	Ca C ₆ H ₁₄ C ₃ H ₈ O C ₁₀ H ₁₄ N ₂ C ₂ H ₇ O ₄ P
3.	фосфор ацетилен этилацетат нитробензол бромметан	P C ₂ H ₂ C ₄ H ₈ O ₂ C ₆ H ₅ O ₂ N CH ₃ Br	9.	магний пропилен этил спирті уротропин диэтилтиоэфир	Mg C ₃ H ₆ C ₂ H ₆ O C ₆ H ₁₂ N ₄ C ₄ H ₁₀ S
4.	көміртегі (II) оксиді бензол сірке қышқылы үшнитроглицерин хлорбензол	CO C ₆ H ₆ C ₂ H ₄ O ₂ C ₃ H ₅ O ₆ N ₃ C ₆ H ₅ Cl	10.	алюминий стирол метил спирті нитроанилин хлорбутан	Al C ₈ H ₈ CH ₄ O C ₆ H ₆ O ₂ N ₂ C ₄ H ₉ Cl

1 тарау. Жану үрдісінің материалдық теңгерімі

5.	калий толуол сірке альдегиді диметиламин фосген	K C ₇ H ₈ C ₂ H ₄ O C ₂ H ₇ N COCl ₂	11.	литий додекан этиленгликоль нитрометан хлорбензол	Li C ₁₂ H ₂₆ C ₂ H ₆ O ₂ CH ₃ O ₂ N C ₆ H ₅ Cl
6.	сутегі ксилол ацетон аммиак дихлорметан	H ₂ C ₈ H ₁₀ C ₃ H ₆ O NH ₃ CH ₂ Cl ₂	12.	цезий циклопентан метан қышқылы нитротолуол хлоргексен	Cs C ₅ H ₁₀ CH ₂ O ₂ C ₇ H ₇ O ₂ N C ₆ H ₁₁ Cl

2. Кестеде келтірілген заттардың диффузионды жалынның сәулелену түрін анықтау.

№	Зат	Формула	№	Зат	Формула
1.	этилацетат	C ₄ H ₈ O ₂	11	стирол	C ₈ H ₈
2.	амилацетат	C ₇ H ₁₄ O ₂	12	глицерин	C ₃ H ₈ O ₃
3.	метанол	CH ₄ O	13	гексан	C ₆ H ₁₄
4.	пропанол	C ₃ H ₈ O	14	пентан	C ₅ H ₁₂
5.	гептил спирті	C ₇ H ₁₆ O	15	декан	C ₁₀ H ₂₂
6.	сірке қышқылы	C ₂ H ₄ O ₂	16	этилбензол	C ₈ H ₁₀
7.	кұмырсқа қышқылы	CH ₂ O ₂	17	этиленгликоль	C ₂ H ₆ O ₂
8.	метилацетат	C ₃ H ₆ O ₂	18	толуол	C ₇ H ₈
9.	циклогексан	C ₆ H ₁₂	19	диоксан	C ₄ H ₈ O ₂
10	гептан	C ₇ H ₁₆	20	гексан	C ₆ H ₁₄

3. Заттың көлемдік және массалық стехиометриялық концентрациясын есептеңіз:

- а) қалыпты жағдайда ауада және оттегіде;
- б) ауада кестеде келтірілген жағдайда.

№	Зат	Формула	$t_0, ^\circ\text{C}$	$P_0, \text{кПа}$
1.	пропил спирті	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	5	102,5
2.	метил спирті	CH_4O	0	98,0
3.	амил спирті	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$	18	100,0
4.	көміртегі (II) оксиді	CO	25	98,0
5.	бутан	C_4H_{10}	5	100,0
6.	пентан	C_5H_{12}	18	101,5
7.	гексил спирті	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	10	100,5
8.	күкіртті оттегі	CS_2	25	102,5
9.	ацетон	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	10	102,5
10.	бензол	C_6H_6	20	101,5
11.	этилацетат	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	15	98,5
12.	этиленгликоль	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$	17	100,5
13.	этил спирті	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	23	101,0
14.	бутилацетат	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2$	30	99,5
15.	анилин	$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	10	101,0

4*. Қалыпты жағдайда ауданы 480 м^3 болатын бөлмеде ацетиленнің C_2H_2 ауамен қоспаның

1 тарау. Жану үрдісінің материалдық теңгерімі

стехиометриялық концентрациясы түзілу үшін кальций карбидінің CaC_2 қандай мөлшері сумен әрекеттесу керек.

5. Кестеде келтірілген заттар үшін ауаның және жану өнімдердің толық көлемдерін есептеңіз. Берілген жағдайда жаңғыш газдың немесе будың берілген көлемдерінің жану кезінде жану өнімдердің пайыздық мөлшерін анықтаңыз.

1 тарау. Жану үрдісінің материалдық теңгерімі

№	Зат		$V_{гв},$ м ³	α	$t_{нач},$ °С	$t_{пр},$ °С
	атауы	формула				
1.	көміртегі (II) оксиді	CO	2	1,8	20	1100
2.	метан	CH ₄	14	1,5	0	900
3.	этан	C ₂ H ₆	4	1,4	5	950
4.	этилен	C ₂ H ₄	7	1,3	18	1200
5.	ацетилен	C ₂ H ₂	80	1,7	10	900
6.	пропан	C ₃ H ₈	9	1,1	25	1200
7.	пропилен	C ₃ H ₆	200	1,6	10	1000
8.	бутан	C ₄ H ₁₀	11	1,2	18	900
9.	бутаналь	C ₄ H ₈ O	3	1,9	32	1100
10.	пентан	C ₅ H ₁₂	25	2,2	20	1100
11.	пентанол	C ₅ H ₁₂ O	3	1,4	15	1200
12.	гексан	C ₆ H ₁₄	12	1,6	40	1200
13.	гексанол	C ₆ H ₁₄ O	1	1,4	22	800
14.	гептан	C ₇ H ₁₆	7	1,5	50	950
15.	октан	C ₈ H ₁₈	4	1,7	13	900
16.	диметил эфирі	C ₂ H ₆ O	5	1,9	25	800
17.	күкіртті сутегі	H ₂ S	7	1,4	30	950
18.	аммиак	NH ₃	5	1,6	27	1000
19.	сірке қышқылы	C ₂ H ₄ O ₂	2	2,0	7	1050
20.	октан қышқылы	C ₈ H ₁₆ O ₂	5	1,7	65	1000

6. Кестеде келтірілген сұйықтар үшін жаңғыш заттың берілген көлемінің жануына қажетті ауа көлемін анықтаңыз. Кестеде берілген жағдайда жану өнімдердің көлемін және құрамын анықтаңыз.

1 тарау. Жану үрдісінің материалдық теңгерімі

№	Зат	Формула	m, кг	α	$t_{\text{нач}},$ °C	$P_0,$ кПа	$t_{\text{пр}},$ °C
1.	пентанол	$C_5H_{12}O$	7	1,1	25	100	900
2.	гексанол	$C_6H_{14}O$	3	2,1	5	105	1000
3.	фенол	C_6H_6O	6	1,5	5	103	800
4.	хлорбензол	C_6H_5Cl	3	1,1	25	97	1100
5.	анилин	C_6H_7N	2	1,3	25	103	1200
6.	нитротолуол	$C_7H_7NO_2$	25	1,6	10	100	1200
7.	глицерин	$C_3H_8O_3$	15	1,4	21	101	1000
8.	этанол	C_2H_6O	80	1,7	10	104	900
9.	диэтил эфирі	$C_4H_{10}O$	5	1,9	25	102	800
10.	толуол	C_7H_8	10	1,5	20	100	1100
11.	ксилол	C_8H_{10}	7	1,1	-10	101	1200
12.	этиленгликоль	$C_2H_6O_2$	4	1,2	12	100	950
13.	хлоргептан	$C_7H_{15}Cl$	5	2,1	31	98	1100
14.	хлоранилин	C_6H_6NCl	1	1,4	17	102	1000
15.	гексаналь	$C_6H_{12}O$	18	1,1	-5	100	650
16.	дибутиламин	$C_8H_{19}N$	35	1,3	25	105	700
17.	бензилтиол	C_7H_8S	48	1,6	25	103	880
18.	диоксан	$C_4H_8O_2$	56	1,4	10	97	590
19.	динитротолуол	$C_7H_6O_4N_2$	14	1,7	21	103	620
20.	терпинеол	$C_{10}H_{18}O$	11	1,9	-10	100	1000
21.	нитроэтан	$C_2H_5O_2N$	8	1,4	25	101	900
22.	тиофен	C_4H_4S	25	1,7	0	103	800
23.	эвгенол	$C_{10}H_{12}O_2$	30	1,9	5	100	1100
24.	цианамид	CH_2N_2	49	1,5	12	101	1200
25.	крезол	C_7H_8O	52	1,1	22	104	950

7. Қай жаңғыш заттың жану кезінде жану өнімдер құрамында көміртегі диоксидінің мөлшері көп болады: егер метанның CH_4 жануы кезінде артық ауа коэффициенті 1,7 болса; ацетиленнің C_2H_2 жануы кезінде - 2,0; бутанның C_4H_{10} жануы кезінде – 2,5.

8*. Ауданы 100 дм^3 сейфті қаскөйлер жарғылары келеді. Олар оны 5 дм^3 сутегімен ($T = 298 \text{ К}$) толтырып, суық өзенге ($T = 280 \text{ К}$) батырып (жарылыстың шуы шықпау үшін), қоспаны жарады. Жарылысқа дейін сейфтің ішіндегі қысым 100 кПа . Үрдіс изохорлы болды деп есептеуге болады. Келесіні анықтаңыз:

а) жарылысқа дейін сейфтің ішінде газдың қанша моль саны болды (сутегі, оттегі, азоттың моль сандары);

б) сейфте жарылыстан кейін қанша моль газ қалды, егер жарылыс нәтижесінде түзілген су толық конденсацияланса;

в) суытылған жану өнімдердің қысымы қандай болады?

9*. 7 кг этилацетаттың $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ жануына 240 м^3 ауа жұмсалды, жану температурасы $21 \text{ }^\circ\text{C}$ және қысым $101,3 \text{ кПа}$. Артық ауа коэффициентін анықтаңыз.

10*. Қыздыру жұмыстарын жүргізу үшін бензол C_6H_6 орналасқан көлемі 50 м^3 сыйымдылық ішіне бензолдың құрғақ жану өнімдерімен толтыру қажет. Жану өнімдер құрамында тек 5 % оттегі болу үшін бензолдың қандай мөлшері жандыру керек және артық ауа коэффициенті қандай болу керек? Шарттар қалыпты деп есептеңіз.

11. Кестеде келтірілген сұйықтар үшін бөлме көлемінде жанған заттың массасын және берілген жану өнімдердің пайыздық құрамын анықтаңыз, егер ауадағы оттегінің қандай мөлшерінде жану үрдісі тоқтағаны белгілі болса. Бастапқы шарттар кестеде көрсетілген. Жану кезінде тек толық жану өнімдері түзіледі.

№	Зат	Формула	$V_{\text{пр}}, \text{ м}^3$	$t_{\text{нач}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$P_{\text{о}}, \text{ кПа}$	O_2 соңғы мөлшері, %	Бастапқы жану өнімі
1.	бензол	C_6H_6	250	18	100	14,6	H_2O
2.	этиленгликоль	$C_2H_6O_2$	150	19	98	14,2	N_2
3.	хлорпентан	$C_5H_{11}Cl$	120	28	102	12,5	HCl
4.	хлорбензол	C_6H_5Cl	100	15	101	16,3	CO_2
5.	сірке қышқылы	$C_2H_4O_2$	200	20	103	11,7	H_2O
6.	нитробензол	$C_6H_5O_2N$	350	22	99	10,5	N_2
7.	күкіртті көміртегі	CS_2	180	15	104	15,2	SO_2
8.	этилбензол	C_8H_{10}	80	20	100	14,8	CO_2
9.	циклогексан	C_6H_{12}	120	0	101	15,5	H_2O
10	диэтилбензол	$C_{10}H_{14}$	100	25	102	16,0	N_2

12*. Кестеде келтірілген сұйық заттар үшін қалыпты жағдайларда жабық бөлмеде жану нәтижесінде түзілетін жану өнімдердің көлемін және пайыздық құрамын анықтаңыз. Бөлменің ауданы кестеде көрсетілген.

№	Зат	Формула	m, кг	$V_{\text{ном}}, \text{м}^3$	анықталатын жану өнімі
1.	ксилол	C_8H_{10}	7	250	H_2O
2.	этиленгликоль	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$	4	150	N_2
3.	хлоргептан	$\text{C}_7\text{H}_{15}\text{Cl}$	5	120	HCl
4.	анилин	$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	1	150	N_2
5.	сірке қышқылы	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	8	200	H_2O
6.	нитробензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_2\text{N}$	4	350	CO_2
7.	күкіртті көміртегі	CS_2	2	180	SO_2
8.	пропилбензол	C_9H_{12}	1	120	N_2
9.	аминобутан	$\text{C}_4\text{H}_{11}\text{N}$	5	100	CO_2
10.	этилэтанолламин	$\text{C}_6\text{H}_{15}\text{ON}$	3	80	H_2O

13. Құрамы көрсетілген жаңғыш газдардың жану кезінде жұмсалатын ауаның, жану өнімдердің көлемі мен құрамының теориялық және нақты көлемдерін анықтаңыз. Жану үрдісі кестеде көрсетілген шарттарда жүреді.

14. Құрамы берілген жаңғыш заттың (массасы, ылғалдылығы W , күлдің мөлшері A берілген) жану кезіндегі ауа көлемін, жану өнімдердің көлемі мен құрамын анықтаңыз. Жану үрдісі кестеде көрсетілген шарттарда жүреді.

1 тарау. Жану үрдісінің материалдық теңгерімі

№	Жаңғыш газдың құрамы, %							$V_{\text{газ}},$ м^3	α	$t_{\text{о}},$ $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{пр}},$ $^{\circ}\text{C}$
	CH_4 (C_2H_4)	CO (N_2)	H_2 (H_2O)	C_5H_{12} (C_2H_2)	C_4H_{10} (C_3H_8)	H_2S (C_2H_6)	O_2				
1.	60	20	–	(20)	–	–	–	5	1,1	20	950
2.	40	30	20	–	–	–	10	15	1,2	12	890
3.	(40)	15	20	–	(20)	–	5	21	2,1	31	780
4.	15	–	–	(35)	(15)	20	15	12	1,4	17	850
5.	35	–	(10)	(25)	25	–	5	2	2,4	7	750
6.	25	5*	10	35	–	(20)	5	16	1,6	15	1085
7.	25	–	60	(5)	–	5	5	11	3,6	10	985
8.	15	–	15	(40)	10	(15)	5	35	1,4	25	1005
9.	10	(15)	22	(30)	(20)	–	3	52	2,5	15	710
10.	25	15	–	30	–	(25)	5	16	1,8	10	910
11.	(45)	20	(5)	(15)	10	–	5	50	2,2	45	1200
12.	65	15*	15	–	–	3	2	70	1,7	20	950
13.		20		50		(30)	–	30	1,7	21	1000
14.		10	10		(70)	6	4	50	1,9	10	650
15.	35	40		25			–	48	1,5	25	700
16.	(10)			20	32	30	8	20	1,1	20	880
17.	50			10	10	24	6	15	1,2	-9	590
18.		5	(8)	5	80		2	35	2,1	12	620
19.	4	6*	(30)			60	–	18	1,4	31	1000
20.			40	30	27		3	46	1,1	17	900
21.		25		(45)	23		7	75	1,3	-5	800
22.	10			10	40	(30)	10	60	1,6	25	450
23.	39		20		20	10	11	37	1,4	10	580
24.				18	10	70	2	10	1,7	25	600
25.	(35)		25		(35)		5	15	1,9	15	730

* – газдың құрамында CO_2 мөлшері.

1 тарау. Жану үрдісінің материалдық теңгерімі

№	Жаңғыш заттың құрамы, %						m, кг	α	t_{02} , °C	P_{02} , кПа	$t_{нгр}$, °C	
	зат	C	O	H	S	N (W)						P (A)
1.	мазут	85	0,4	14	0,3	0,3	–	2,6	2,1	12	86,0	950
2.	резина	83		11	3		3	5,2	1,1	22	106	970
3.	битумды шайыр	80		11	6	3	–	14,5	2,1	5	103	700
4.	капронды шайыр	78	6	9		7	–	12	2,5	25	100	830
5.	ағаш	42	43	5		(9)	(4)	16	2,6	7	93	810
6.	– « –					(8)	(5)			35	95	650
7.	мұнай	81	1	11	1	(6)		25	2,1	12	86	950
8.	улы химикаттар	53	10	21	8		8	52	2,6	5	105	970
9.	– « –	68	12	8	5	(5)	(2)		1,4	22	102	550
10.	– « –	70	5	12	4	3	6		2,0	18	98	900
11.	эпоксидті шайыр	75		14	5	6	–	45	2,1	17	103	750
12.	– « –	72	12	8		8	–	30	1,9	22	99	660
13.	керосин	85	1	13	1	–	–	15	1,5	12	101	830
14.	қоңыр көмір	76	5	6	2	2	(9)	80	2,3	16	100	650
15.	– « –	70	8	8	3		(8)	45	1,4	-7	103	880
16.	– « –	73	7	6	2	1	(11)	60	1,3	28	95	740
17.	– « –	72	8	7	1		(12)	75		16	98	430
18.	тас көмір	78	2	15	1,5	3,5	(8)	50	2,2	20	99	950
19.	– « –	80	5	9	2	–	(4)	85	2,5	10	97	580
20.	– « –	76	6	10	3	–	(5)	90	1,6	-5	104	840

15. Көлемі $1,8 \text{ м}^3$ ыдыстан құрамы: H_2 – 7 %, CH_4 – 30 %, C_2H_5 – 50 %, C_4H_{10} – 10 %, H_2S – 3 % болатын газ қоспасын шығарады. Қалыпты жағдайда газдың барлық көлемінің диффузионды жалын түрінде толық жануына

1 тарау. Жану үрдісінің материалдық теңгерімі
қажетті ауа көлемін анықтаңыз. Артық ауа коэффициенті α
= 3. Газдың судағы ерігіштігін есепке алмаңыз.

16*. Өлшемі $8 \times 5 \times 3$ м болатын кептіргіш камерада
құрамы: С – 47 %; Н – 5 %; О – 40 %; ағаштың
ылғалдылығы $W = 8$ % болатын ағаштың жануымен өрт
пайда болды. Егер жалынды жану оттегінің
концентрациясы 14 %-дан төмен болған кезде токтаса,
ағаштың қандай мөлшері жанды. Өрт шарттары:
температура 1000 °С, қысым 98 кПа.

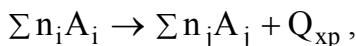
17*. Келесі құрамды: H_2 – 6 %; CH_4 – 75 %; C_2H_6 –
3 %; C_3H_8 – 5 %; O_2 – 11 % табиғи газдың 1 сағат ішінде
толық жануына қажетті ауа көлемін анықтаңыз. Газ
жаңғыштың (газовая горелка) шығыны $45 \text{ л} \cdot \text{хв}^{-1}$ құрайды.

2 ТАРАУ.

ЖАНУ ҮРДІСІНІҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ТЕҢГЕРІМІ

Термодинамиканың бірінші заңына сәйкес химиялық реакция жүру кезінде жану үрдістердің энергетикалық теңгерімі энергия сақталу заңын білдіреді. Энергияның сақталу заңы келесіні түсіндіреді: әрекеттесуге түскен заттардың жалпы ішкі энергия қоры немесе энтальпиясы жану өнімдердің ішкі энергия немесе энтальпия және реакция нәтижесінде бөлінген жылудың қосындысына тең болады, егер жүйеде температура мен қысым өзгермесе (изобара-изотермиялық үрдіс), немесе жүйедегі көлем мен температура өзгермесе (изохора-изотермиялық үрдіс) [4] – [6].

Энергетикалық теңгерімнің есептелуі Г.И. Гесс заңына сәйкес реакцияның жылулық әсерін ескертетін термохимиялық реакция теңдеуі бойынша жүргізіледі:



мұнда n_i – бастапқы заттардың моль саны A_i ;

n_j – жану өнімдердің моль саны A_j ;

Q_{xp} – реакцияның жылулық әсері.

Реакцияның жылулық әсері – температура мен қысым немесе температура мен көлемнің тұрақтылығы шартында қайтымсыз химиялық реакция жүру кезінде жүйеде бөлінетін немесе жұмсалатын жылудың мөлшері.

Жүйенің бастапқы және соңғы энергия деңгейлері реакция жылулық мөлшеріне өзара айырылады $Q_{\text{хр}}$:

$$E_{\text{соңғы}} - E_{\text{бастапқы}} = Q_{\text{хр}}. \quad (2.1)$$

Энергия өлшеміне жүйенің ішкі энергияны U немесе энтальпияны H алады.

Жүйенің ішкі энергиясы – бұл жалпы энергияның қоры, бөлшектердің кинетикалық энергия мен олардың әрекеттесудің потенциалдық энергиялардың қосындысы, жалпы химиялық байланыстың энергиясы.

Энтальпия – бұл қысым тұрақтылығы шартында кеңею жұмысы атқарылатын жүйенің ішкі энергиясы:

$$\Delta H = \Delta U + P \cdot \Delta V, \quad (2.2)$$

немесе идеалды газ жағдайына келтіретін болсақ $PV = nRT$:

$$\Delta H = \Delta U + \Delta nRT, \quad (2.3)$$

мұнда Δn – бастапқы заттар мен жану өнімдердің моль сандарының азайтындысы.

Жүйенің ішкі энергиясы мен энтальпиясы бастапқы нүктеге ие болмайды және нольге тең болмайды, себебі энергиясы болмайтын жағдайға жүйені келтіруге мүмкін емес. Сондықтан реакцияның энергетикасын анықтау үшін реакция кезіндегі энергияның өзгеруін (ΔH , ΔU) анықтау қажет.

Химиялық реакцияның жылулық әсері жүйеде ішкі энергияның ΔU (жүйенің көлемі тұрақты болса) немесе энтальпияның ΔH (егер жүйедегі қысым өзгеріссіз болса) өзгеруінен пайда болады.

Жану үрдісі өздігінен пайда болады, яғни жану кезінде химиялық реакцияның пайдалы жұмыс атқаруға жұмсалатын жүйенің ішкі энергиясы азаяды және жүйе тұрақты күйге ауысады. Пайдалы жұмыс Гиббстің термодинамикалық потенциалдары (ΔG , егер қысым мен температура тұрақты болса) немесе Гельмгольцтің термодинамикалық потенциалдары (ΔF , егер көлем мен температура тұрақты болса) арқылы анықталады:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S; \quad \Delta F = \Delta U - T\Delta S, \quad (2.4)$$

мұнда T – жүйенің абсолютті температурасы;

ΔS – жүйенің энтропиясы.

Үрдістің өздігінен жүруі осы параметрлердің (ішкі энергияның) төмендеуімен түсіндіріледі, яғни

$$\Delta G_{P,T} < 0, \quad \Delta F_{V,T} < 0. \quad (2.5)$$

Жану кезінде жүйедегі моль сандарының жоғарлауына $\Delta n > 0$ және жүйенің температурасының да жоғарлауына байланысты жүйенің энтропиясы көбейеді $\Delta S > 0$. Осы жағдайларда термодинамикалық потенциалдардың мәндері тек $\Delta H < 0$ немесе $\Delta U < 0$ кезінде ғана төмендейді.

Егер реакция аяқталғанда жүйенің энтальпиясы немесе ішкі энергиясы төмендесе, онда энергия бөлінеді, яғни *экзотермиялық* реакция жүреді ($\Delta H < 0$, $\Delta U < 0$). Егер жану өнімдердің энтальпиясы бастапқы заттардың энтальпиясынан жоғары болса ($\Delta H > 0$, $\Delta U > 0$), онда реакция тек қосымша жылу берілсе ғана жүреді, яғни ол *эндотермиялық* болады. Сонымен, жану реакция әрқашан экзотермиялық реакция болып табылады.

Термодинамиканың бірінші заңына сәйкес, жүйеден бөлінген жылу келесі теңдеуге тең болады:

$$-dQ = dU + PdV = dH - VdP. \quad (2.6)$$

Реакцияның жылулығы оның бағытына тәуелді емес, ол тек жүйенің бастапқы және соңғы күйіне байланысты (Гесс заңы). Егер жану тұрақты қысымда жүрсе, яғни $dP = 0$, онда реакцияның жылуы жүйенің бастапқы және соңғы күйіндегі энтальпия азайтындысына тең болады:

$$Q_p = -\int dH = -\Delta H. \quad (2.7)$$

Егер жану жабық көлемде немесе жарылыс кезіндегідей тұрақты көлемде жүрсе, онда $dV = 0$ және реакцияның жылулығын келесі қатынаспен анықтауға болады:

$$Q_v = -\int dU = -\Delta U. \quad (2.8)$$

Сонымен, реакцияның жылуы жүйенің күйіне байланысты және соңғы реакция өнімдердің күйіне тәуелді болады. Мысалы, су – бу немесе сұйық күйінде, көміртегі – графит немесе алмаз түрінде (кристаллдық құрылысына байланысты) және т.б.

Жану жылулығы – бұл толық жану өнімдердің пайда болуымен жүретін 1 моль жаңғыш заттың жануы кезінде

бөлінетін жылулық мөлшері. Бастапқы заттар және соңғы өнімдер тұрақты жағдайда болуы шарт.

Химиялық реакцияның жылулық әсерін есептеу үшін жай заттардан қосылыстардың тұрақты түзілу жылулығын пайдаланады:

$$\Delta H_{\text{гор}}^{\circ} = \sum_i n_{\text{пг}_i} \Delta H_{\text{ф}_\text{пг}_i}^{\circ} - \sum n_{\text{гс}} \Delta H_{\text{ф}_\text{гс}}^{\circ}, \quad (2.9)$$

мұнда $\Delta H_{\text{гор}}^{\circ}$ – тұрақты жану жылулығы, кДж моль⁻¹;

$\Delta H_{\text{ф}_\text{пг}_i}^{\circ}$ – i жану өнімнің тұрақты түзілу жылулығы, кДж моль⁻¹;

$n_{\text{пг}_i}$ – i жану өнімнің моль саны;

$\Delta H_{\text{ф}_\text{гс}}^{\circ}$ – жаңғыш қоспа компоненттерінің тұрақты түзілу жылулығы, кДж моль⁻¹;

$n_{\text{гс}}$ – жаңғыш қоспа компоненттерінің моль саны.

Заттың тұрақты түзілу жылулығы $\Delta H_{\text{ф}}^{\circ}$ – тұрақты жағдайларда ($P = 101,3$ кПа, $T = 298$ К) жай заттардан 1 моль қосылыстың түзілуімен жүретін реакция жылулығы.

Жай заттың тұрақты түзілу жылулығы нольге тең болады.

Ауадағы жану реакциясы жаңғыш заттың 1 моль санына есептеледі, жаңғыш қоспа құрамы жаңғыш заттан ғана емес, сонымен бірге тұрақты түзілу жылулығы нольге тең оттегі және азоттан тұрады, сондықтан жану реакцияның жылулық әсері келесі теңдеумен өрнектеледі:

$$\Delta H_{\text{гор}} = \sum_i n_{\text{пг}_i} \Delta H_{\text{ф}_i}^{\circ} - \Delta H_{\text{ф}_\text{гр}}^{\circ} \quad (2.10)$$

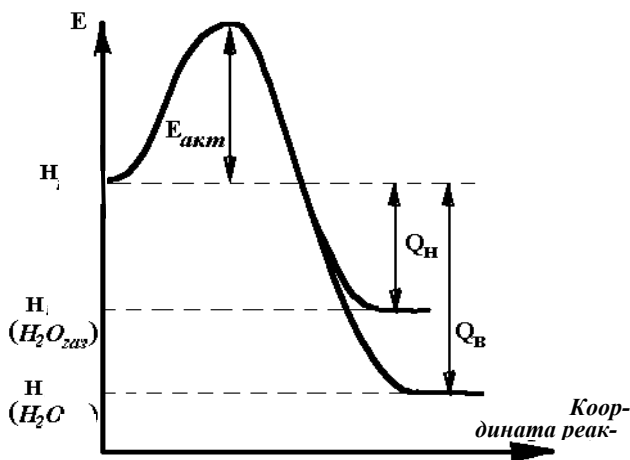
Жаңғыш заттың мөлшер бірлігін анықтау түріне байланысты жану жылулықтың келесі түрлерін айырады: *молярлы* (немесе *тұрақты*) Q (кДж моль⁻¹) – жаңғыш заттың 1 моль жану кезінде, *массалық* Q' (кДж кг⁻¹) – жаңғыш заттың 1 кг жану кезінде және *көлемдік* Q'' (кДж м⁻³) – жаңғыш заттың 1 м³ жану кезінде.

Жану кезінде пайда болған және жану өнімдердің құрамында болатын судың агрегаттық күйіне байланысты жоғарғы $Q_{\text{в}}$ және төменгі $Q_{\text{н}}$ жану жылулығын айырады.

Жоғарғы жану жылулығы – бұл жаңғыш қоспа мен жану өнімдері қалыпты жағдайда болатын, ал жану өнімдердің құрамындағы су конденсацияланған (сұйық) күйде болатын шартында жаңғыш заттың бірлік саны толық жану кезінде бөлінетін жылу мөлшері.

Төменгі жану жылулығы – бұл жаңғыш қоспа мен жану өнімдері қалыпты жағдайда болатын, ал жану өнімдері құрамындағы су газ күйінде болатын шартында жаңғыш заттың бірлік мөлшерінің толық жану кезінде бөлінетін жылу мөлшері.

Сызба түрінде, төменгі және жоғарғы жану жылулығы арасындағы айырмашылық 2.1 суретте көрсетілген.



Сурет 2.1 – Судың газ немесе сұйық күйіндегі жанудың экзотермиялық реакцияның жылулық әсері

($E_{акт}$ – химиялық реакцияны бастау үшін бастапқы жүйеге жіберілетін минималды энергия мөлшері)

Жоғарғы жану жылулығы төменгі жану жылулығынан ерекшеленеді. Төменгі жану жылулығы жану өнімдердің құрамында болатын судың конденсациялау $Q_{\text{конд}}$ кезінде бөлінеді:

$$Q_{\text{в}} - Q_{\text{н}} = Q_{\text{конд}}; \quad (2.11)$$

$$Q_{\text{конд}} = n_{\text{H}_2\text{O}} \Delta H_{\text{исп}}, \quad (2.12)$$

мұнда $n_{\text{H}_2\text{O}}$ – жану өнімдер құрамындағы судың мөлшері, моль;

$\Delta H_{\text{исп}}$ – судың молярлық булану жылулығы, кДж·моль⁻¹.

Төменгі жану жылулығынан әрқашан төмен болатын және заттың жану жылулығына әсер ететін факторларды (толық емес химиялық жану, заттың ылғалдылығы, сәулеленуге жылудың жұмсалынуы) есепке алған жағдайда **тәжірибелік** немесе **жұмыс жану жылулығын** $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$ анықтайды. Заттың құрамында судың мөлшері көбейген кезде оның булануына жұмсалатын энергия мөлшері артады, ал тәжірибелік жану жылулығы төмендейді.

Энергетикалық теңгерімді есептеудің

тәжірибелік маңызы

Энергетикалық теңгерімді есептеудің негізінде жану жылулығын есептеу жатады. Заттардың өрт қауіпі параметрлерін және өрттің даму параметрлерін есептеу кезінде жану жылулығын анықтаудың тәжірибелік маңызы мол.

1. Өрт жүктемесін $P_{\text{пож}}$, $\text{МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ есептеу кезінде жану жылулығын қолданады. Өрт жүктемесі құрылыс құрылғыларына өрттің жылулық әсерінің сандық сипаттамасы болып табылады.

2. Заттардың өрт қауіпі сипаттамаларын, яғни заттың жану температурасын, жарылыс температурасын, жалын таралудың төменгі концентрациялық шегін, жарылыстың максималды қысымын, жарылыс кезінде қысымның өсу жылдамдығын анықтау үшін төменгі жану жылулығын қолданады.

3. Заттың жаңғыштығын жану жылулығы бойынша анықтауға болады. Егер төменгі жану жылулығы газдар үшін $1830 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}$ мәнінен төмен болса, булар немесе қатты заттар үшін $2100 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ мәнінен төмен болса, және олар жарылыс қауіпі бар заттарға жатпаса, онда осындай заттардың жаңғыш емес қатарына жататыны тәжірибелік зерттеулермен дәлелденген.

§ 1. Жеке заттар мен күрделі материалдардың жану жылулығын есептеу

Жану реакцияның жылулық әсерін есептеу үшін элементтерден жеке заттардың тұрақты түзілу жылулығын ΔH_f^0 қолданады. Сонымен қатар, оны өрт қауіпі көрсеткіштерін: жалын таралудың концентрациялық және температуралық шектерін, жаңғыш емес газдардың минималды флегматикалық концентрациясын және т.б. есептеу кезінде де қолданады.

§ 1.1. Расчет стандартной теплоты образования индивидуальных веществ

Газ күйіндегі заттардың тұрақты түзілу жылулығын бағалау үшін осы заттың атомдары арасындағы химиялық байланыстарды үзу энергия мәндерін қолданады:

$$\Delta H_f^0 = \sum_i \Delta(\Delta H_f^0)_i n_i, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}, \quad (2.13)$$

мұнда $\Delta(\Delta H_f^0)_i$ – молекула энтальпиясына i -түріне жататын байланыстың аддитивті үлесі, 1.7 кестесін қара, $\text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$;

n_i – молекуладағы i -түріне жататын байланыстың саны.

Аддитивті үлестер – бұл атом түрлеріне, олардың валенттілігіне, байланыстар санына, байланыстардың кернеулігіне байланысты химиялық байланыстың үзу энергияның мәні.

Кесте 2.1 – Заттың тұрақты түзілу жылулығын есептеу кезінде әртүрлі түрге жататын байланыстардың аддитивті үлестері

Байланыс түрі	Үлесі $\Delta(\Delta H_f^0)$, кДж·моль ⁻¹	Байланыс түрі	Үлесі $\Delta(\Delta H_f^0)$, кДж·моль ⁻¹
C – C	19,645	C – N ⁵	-21,186
C = C	115,767	C – N ³	41,869
C \cdots C (аром. байланыс)	22,483	O = N ⁵	-3,684
C – H	-19,703	O – N ⁵	45,763
C – O	-49,866	H – N ³	-5,904
C = O	-134,19	O – H	-123,681

Тұрақты түзілу жылулығын есептеу әдістемесі

1. Химиялық байланыс түрлерін көрсетумен заттың құрылымдық формуласын жазу.

2. і-түріне жататын байланыстардың түрін және санын анықтау.

3. 2.1 кесте бойынша байланыстардың аддитивті үлестер $\Delta(\Delta H_f^0)$ мөлшерін анықтау.

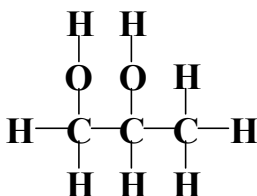
4. (2.13) формула бойынша заттың түзілу жылулығын ΔH_f° есептеу.

Есеп шығару мысалы

Пропиленгликольдің түзілу жылулығын есептеу.

Шығару

1. Пропиленгликольдің құрылымдық формуласын анықтаймыз:



2. Байланыстар түрін, санын заттың түзілу жылулығына олардың аддитивті үлестерін $\Delta(\Delta H_f^\circ)$ анықтаймыз. Ыңғайлық үшін кесте құрастырамыз:

Байланыс түрі	Байланыс саны	Үлесі $\Delta(\Delta H_f^\circ)$, кДж·моль ⁻¹
C – C	2	19,65
C – H	6	-19,7
C – O	2	-49,9
O – H	2	-123,68

3. (2.13) формула бойынша пропиленгликольдің түзілу жылулығын есептейміз:

$$\begin{aligned}\Delta H_f^0 &= 19,65 \cdot 2 + (-19,7)6 + (-49,9)2 + (-123,7)2 = \\ &= -426 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.\end{aligned}$$

Қорытынды: пропиленгликольдің есептелген түзілу жылулығы минус 426,0 кДж·моль⁻¹. Анықтама [12] мәліметтері бойынша бұл заттың түзілу жылулығы минус 499,90 кДж·моль⁻¹, сондықтан есептеудің қатесі 14,8 % құрайды.

§ 1.2. Жеке заттардың жану жылулығын есептеу

Молярлық (тұрақты) жану жылулығын (жоғарғы және төменгі) жану жылулығы үшін термохимиялық белгілер жүйесін қолданып, Гесс заңы бойынша есептейді, (2.10) формуласын қара):

$$Q_{\text{гор}} = \left| \Delta H_{\text{гор}}^0 \right|, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$Q_{\text{гор}} = \left| \sum_i \Delta H_{\text{f пр } i}^0 \cdot n_{\text{пр } i} - \Delta H_{\text{f гр}}^0 \right|, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1} \quad (2.14)$$

Молярлық жану жылулығын $Q_{\text{гор}}$ (жоғарғы және төменгі) массалық жану жылулығына $Q'_{\text{гор}}$ айналдыру үшін келесі формуланы қолданады:

$$Q'_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{гор}} \cdot 1000}{\mu_{\text{гр}}}, \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}, \quad (2.15)$$

мұнда $\mu_{\text{гр}}$ – жаңғыш заттың молярлық массасы, $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$.

Газ күйіндегі заттар үшін молярлық жану жылулықтың $Q_{\text{гор}}$ көлемдік жану жылулығына $Q''_{\text{гор}}$ қайта есептелуі келесі формула бойынша жүреді:

$$Q''_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{гор}} \cdot 1000}{V_{\mu}}, \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (2.16)$$

мұнда V_{μ} – берілген жағдайларда газдың молярлық көлемі, $\text{м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$.

Жану өнімдер құрамында кездесетін кейбір жаңғыш және жаңғыш емес заттардың түзілу жылулығы қосымшаның 4, 6, 7 кестелерінде және [13] анықтамада келтірілген.

Жеке заттың жану жылулығын есептеудің әдістемесі

1. Заттың жану реакциясының теңдеуін құрастыру.
2. Жану өнімдері мен жаңғыш заттың тұрақты түзілу жылулығын анықтау, (2.14) формула бойынша жоғарғы және төменгі жану жылулығын есептеу.
3. Заттың молярлық массасын анықтау.
4. (2.15) формула бойынша молярлық жану жылулығын массалық жану жылулығына айналдыру.
5. (1.10) формула бойынша берілген шарттарда газдың молярлық көлемін есептеу.

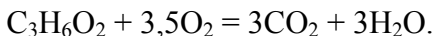
6. (2.16) формула бойынша молярлық жану жылулығын көлемдік жану жылулығына айналдыру.

Есеп шығару мысалы

Тұрақты жағдайларда этилформиаттың $C_3H_6O_2$ тұрақты, массалық және көлемдік жоғарғы және төменгі жану жылулықтарын анықтау.

Шығару

1. Этилформиаттың жану реакциясының теңдеуін құрастырамыз:



2. Гесс заңы бойынша этилформиаттың молярлық жоғарғы және төменгі жану жылулықтарын есептейміз (2.14).

Қосымшаның 4 кестесі бойынша жану өнімдердің тұрақты түзілу жылулықтар мәндерін қолданамыз; этилформиаттың тұрақты түзілу жылулығын қосымшаның 14 кестесін аламыз:

этилформиат ΔH_f^0 $C_3H_6O_2 = -371,2$
кДж·моль⁻¹;

көмірқышқыл газы	$\Delta H^{\circ}_{f\text{CO}_2} = -393,5$
кДж·моль ⁻¹ ;	
бу күйіндегі су	$\Delta H^{\circ}_{f\text{H}_2\text{O}(\text{г})} = -241,8$ кДж·моль ⁻¹ ;
сұйық күйіндегі су	$\Delta H^{\circ}_{f\text{H}_2\text{O}(\text{ж})} = -285,8$ кДж·моль ⁻¹ .

$$Q_{\text{в}} = \left| n_{\text{CO}_2} \Delta H^{\circ}_{f\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} \Delta H^{\circ}_{f\text{H}_2\text{O}(\text{ж})} - \Delta H^{\circ}_{f\text{гп}} \right| =$$

$$= |3 \cdot (-393,5) + 3 \cdot (-285,8) - (-371,2)| = 1667,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

$$Q_{\text{н}} = \left| n_{\text{CO}_2} \Delta H^{\circ}_{f\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} \Delta H^{\circ}_{f\text{H}_2\text{O}(\text{г})} - \Delta H^{\circ}_{f\text{гп}} \right| =$$

$$= |3 \cdot (-393,5) + 3 \cdot (-241,8) - (-371,2)| = 1535,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. этилформиаттың молярлық массасын анықтаймыз:

$$\mu_{\text{гв}} = 3 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 2 \cdot 16 = 74 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}.$$

4. (2.15) формула бойынша молярлық жану жылулығын массалық жану жылулығына айналдырамыз:

$$Q'_{\text{в}} = \frac{1667,7 \cdot 1000}{74} = 22536,3 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1},$$

$$Q'_H = \frac{1535,7 \cdot 1000}{74} = 20752,6 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

5. Тұрақты жағдайларда газдың молярлық көлемі
 $V_\mu = 24,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$.

6. (2.16) формула бойынша молярлық жану жылулығын көлемдік жану жылулығына айналдырамыз:

$$Q''_B = \frac{1667,7 \cdot 1000}{24,4} = 67486,8 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3},$$

$$Q''_H = \frac{1535,7 \cdot 1000}{24,4} = 63987,1 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

Қорытынды: этилформиат үшін келесі жану жылулықтары тән:

молярлық $Q_B = 1667,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$, $Q_H = 1535,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$;

массалық $Q'_B = 22536,3 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$, $Q'_H = 20752,6 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$;

көлемдік $Q''_B = 67486,8 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}$, $Q''_H = 63987,1 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}$.

§ 1.3. Күрделі заттар мен материалдардың жану жылулығын есептеу

Газды қоспалардың жану жылулықтары олардың құрамына және әрбір компоненттің жану жылулығына байланысты. Негізгі газдардың қалыпты жағдайдағы көлемдік жану жылулықтарының белгілі мәндері 2.2 кестеде көрсетілген.

Кесте 2.2 – Кейбір газдардың және булардың қалыпты жағдайдағы жоғарғы және төменгі көлемдік жану жылулық мәндері

Зат		Жану жылулығы, кДж·м ⁻³	
атауы	формула	жоғарғы Q'' _в	төменгі Q'' _н
сутегі	H ₂	12750	10790
көміртегі(II) оксиді	CO	12640	12640
күкіртсутегі	H ₂ S	25350	23700
метан	CH ₄	39820	35880
ацетилен	C ₂ H ₂	55123	53320
этилен	C ₂ H ₄	57623	54016
этан	C ₂ H ₆	70310	64360
пропан	C ₃ H ₈	101210	93180
н-бутан	C ₄ H ₁₀	133800	123570
н-пентан	C ₅ H ₁₂	169270	150630
н-гексан	C ₆ H ₁₄	187400	187400
н-гептан	C ₇ H ₁₆	216880	200550

Газ қоспаларының жану жылулығы – бұл қоспа компоненттерінің мөлшерін есепке алғанда жану жылулықтарының қосындысы:

$$\text{көлемдік: } Q''_{\text{н(в)}}_{\text{сум}} = \sum_i Q''_{\text{н(в)}}_i \cdot r_i, \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (2.17)$$

$$\text{массалық: } Q'_{\text{н(в)}}_{\text{сум}} = \sum_i Q'_{\text{н(в)}}_i \cdot g_i, \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1},$$

мұнда $Q''_{\text{н(в)}}_i$ – қоспаның жаңғыш i компонентінің төменгі (немесе жоғарғы) көлемдік жану жылулығы, $\text{кДж} \cdot \text{м}^{-3}$;

$Q'_{\text{н(в)}}_i$ – қоспаның жаңғыш i компонентінің төменгі (немесе жоғарғы) массалық жану жылулығы, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$;

r_i – газ қоспасындағы i жаңғыш компонентінің көлемдік үлесі;

g_i – газ қоспасындағы i жаңғыш компонентінің массалық үлесі.

Газ қоспасындағы компоненттің көлемдік r_i және массалық g_i үлестері бір-бірімен келесі формула арқылы байланысты:

$$g_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_k r_k \mu_k},$$

мұнда μ_i – сәйкес i компонентінің молярлық массасы.

Құрылысы белгісіз жаңғыш заттар үшін немесе химиялық қосылыстар қоспасы болып табылатындар үшін жанудың массалық жылулығын Менделеев теңдеуі бойынша анықтайды. Бұл теңдеуге сәйкес жоғарғы жану жылулығы:

$$Q'_B = 339,4\varphi_C + 1256,8\varphi_H + 108,9(\varphi_S - \varphi_O - \varphi_N), \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}; \quad (2.18)$$

Төменгі жану жылулығын анықтау үшін жану өнімдер құрамындағы су буларының конденсациялануын ескеру керек:

$$\begin{aligned} Q'_H &= Q'_B - 25,1(9\varphi_H + W) = \\ &= 339,4\varphi_C + 1256,8\varphi_H + 108,9(\varphi_S - \varphi_O - \varphi_N) - 25,1(9\varphi_H + W), \\ &\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}, \end{aligned} \quad (2.19)$$

мұнда φ_C , φ_H , φ_S , φ_O , φ_N , W – жаңғыш заттың құрамындағы сәйкес көміртегінің, сутегінің, күкірттің, оттегінің, азоттың және ылғалдың массалық пайыздық мөлшері.

Менделеев теңдеуін жеке заттардың және құрамы күрделі химиялық заттардың жану жылулығын есептеу үшін қолданады.

***Газ қоспасының жану жылулығын
анықтау әдістемесі***

1. Әрбір жаңғыш компоненттің ауада жану реакция теңдеуін құрастыру.

2. (2.13) формула немесе қосымшаның 4 кестесі бойынша жану өнімдердің немесе қоспаның әрбір жаңғыш компонентінің түзілу жылулығын анықтау.

3. Гесс заңы немесе анықтамалық мәліметтер [14] бойынша қоспаның әрбір i компонентінің жоғарғы және төменгі молярлық жану жылулығын анықтау.

4. (2.16) формула бойынша алынған жанудың молярлық жылулық мәндерін көлемдік жану жылулығына айналдыру немесе 2.2 кестесі бойынша негізгі газдардың көлемдік жану жылулық мәндерін қолдану керек.

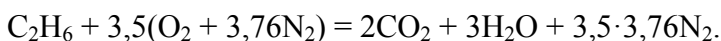
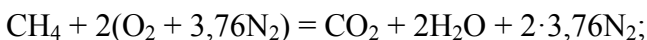
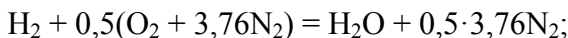
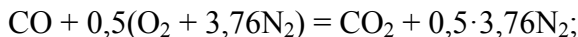
5. (2.17) формула бойынша әрбір компоненттің пайыздық мөлшерін ескеріп, газ қоспасының көлемдік жану жылулығын анықтау.

Есеп шығару мысалы

Тұрақты жағдайларда құрамы $\text{CO} - 6,8\%$, $\text{H}_2 - 57\%$, $\text{N}_2 - 7,7\%$, $\text{CO}_2 - 2,3\%$, $\text{CH}_4 - 22,5\%$, $\text{C}_2\text{H}_6 - 3,7\%$ болатын кокс газының төменгі жану жылулығын анықтау.

Шығару

1. Қоспаның жаңғыш компоненттердің ауада жану реакция теңдеуін құрастырамыз:



2. Қоспаның әрбір компонентінің және жану өнімдердің түзілу жылулықтың анықтамалық мәндерін анықтау [14]:

көміртегі (II) оксиді $\Delta H_{\text{fCO}}^{\circ} = -110,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$,

сутегі $\Delta H_{\text{fH}_2}^{\circ} = 0 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$,

2 тарау. Жану үрдісінің энергетикалық теңгерімі

метан	$\Delta H^{\circ}_{f\text{CH}_4} = -74,85 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$,
этан	$\Delta H^{\circ}_{f\text{C}_2\text{H}_6} = -84,67 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$,
азот	$\Delta H^{\circ}_{f\text{N}_2} = 0 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$,
бу күйіндегі су	$\Delta H^{\circ}_{f\text{H}_2\text{O}(г)} = -241,8 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$,
көмірқышқыл газы	$\Delta H^{\circ}_{f\text{CO}_2} = -393,5 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$.

3. (2.14) формула бойынша қоспа құрамындағы әрбір жаңғыш компоненттің төменгі молярлық жану жылулығын есептейміз:

$$Q_{\text{H CO}} = |(-393,5) \cdot 1 - (-110,6)| = 283,18 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1},$$

$$Q_{\text{H H}_2} = |(-241,8) \cdot 1 - 0| = 241,84 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1},$$

$$Q_{\text{H CH}_4} = |(-393,5) \cdot 1 + (-241,8) \cdot 2 - (-74,8)| = 802,6 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1},$$

$$Q_{\text{H C}_2\text{H}_6} = |(-393,5) \cdot 2 + (-241,8) \cdot 3 - (-84,7)| = 1428,4 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}.$$

4. (2.16) формула бойынша қоспаның әрбір жаңғыш компонентінің төменгі көлемдік жану жылулығын есептейміз, тұрақты жағдайда газдың молярлық көлемі $V_{\mu}=24,4 \text{ м}^3\cdot\text{кмоль}^{-1}$ құрайды:

$$Q''_{\text{HCO}} = \frac{283,18 \cdot 1000}{24,4} = 11799 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q''_{\text{H}_2} = \frac{241,84 \cdot 1000}{24,4} = 10077 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q''_{\text{HCH}_4} = \frac{802,61 \cdot 1000}{24,4} = 33442 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q''_{\text{HC}_2\text{H}_6} = \frac{1428,41 \cdot 1000}{24,4} = 59517 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

5. Құрамы берілген кокс газының төменгі көлемдік жану жылулығын анықтаймыз:

$$Q''_{\text{см}} = \frac{11799 \cdot 6,8 + 10077 \cdot 5,7 + 33442 \cdot 22,5 + 59517 \cdot 3,7}{100} =$$

$$= 16273 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

Жауабы: тұрақты жағдайда құрамы берілген кокс газының төменгі көлемдік жану жылулығы – 16273 кДж·м⁻³.

Қоспаның және күрделі заттардың жану

жылулығын анықтау әдістемесі

1. Егер жаңғыш заттың құрамындағы элементтердің пайыздық мөлшері белгісіз болса, оны (1.2) формула бойынша анықтау.

2. (2.18), (2.20) Менделеев формуласы бойынша жоғарғы және төменгі жану жылулығын есептеу.

Есеп шығару мысалы

Төменгі массалық жану жылулығын анықтап, қай заттың жануы кезінде энергияның көп мөлшері бөлінетініне түсініктеме беру: элементтік құрамы: С – 49 мас. %; Н – 6,5 мас. %; О – 39 мас. % ағаштың; элементтік құрамы: N – 0,5 мас. %; W – 5 мас. % ағаштың; немесе құрамы: С – 79,4 мас. %; Н – 5,3 мас. %; О – 10,3 мас. % тас көмірдің; құрамы: S – 2,8 мас. %; W – 1,2 мас. % тас көмірдің.

Шығару

Менделеев теңдеуі бойынша әрбір заттың төменгі массалық жану жылулығын анықтаймыз:

- ағаш үшін:

$$Q'_H = 339,4 \cdot 49 + 1256,8 \cdot 6,5 - 108,9(39 + 0,5) - 25,1(9 \cdot 6,5 + 5) = 18841,6 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1};$$

- көмір үшін:

$$Q'_H = 339,4 \cdot 79,4 + 1256,8 \cdot 5,3 - 108,9(10,3 - 2,8) - 25,1 \cdot (9 \cdot 5,3 + 1,2) = 31541,4 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

Қорытынды: ағаштың 1 кг жануымен салыстырғанда тас көмірдің 1 кг жану кезінде жылу көп бөлінеді.

§ 1.4. Өрт жүктемесін есептеу

Өрт жүктемесін $R_{\text{пож}}$ есептеу кезінде жану жылулық мәнін қолданады. Өрт жүктемесі – бұл өрттің құрылыс құрылғыларына жылулық әсерінің сандық сипаттамасы.

Салыстырмалы өрт жүктемесі – бұл бөлменің еден бетінің 1 м^2 аумағында заттар мен материалдардың жану кезінде бөлінетін жылу мөлшері.

Бөлменің өрт жүктемесін уақытша және тұрақты деп екіге бөледі және төмендегі формулаға сәйкес барлық жаңғыш заттардың массаларының олардың төменгі жану жылулығына көбейтіндісін еденнің аумақ бірлігіне қатынасы арқылы анықтайды:

$$R_{\text{пож}} = \frac{\sum_i m_i Q'_{\text{н}i}}{S_{\text{пол}}}, \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (2.20)$$

мұнда m_i – i жаңғыш материалдың массасы, кг;

$Q'_{\text{н}i}$ – i жаңғыш материалдың төменгі массалық жану жылулығы, $\text{МДж} \cdot \text{кг}^{-1}$;

$S_{\text{пол}}$ – еден аумағы, м^2 .

Өрт жүктемесін есептеу әдістемесі

1. Бөлмеде орналасқан барлық жаңғыш заттардың түрін және массасын анықтау.

2. (2.15) немесе (2.19) формулалар бойынша немесе [15], [16], [20] анықтамалық құжаттар немесе қосымшаның 5 кестесі бойынша әрбір заттың төменгі массалық жану жылулығын анықтау.

3. Бөлменің еден аумағын есептеу.

4. (2.20) формула бойынша өрт жүктемесін есептеу.

Есеп шығару мысалы

Өлшемі 114x38 м² болатын бөлменің өрт жүктемесін есептеңіз, егер оның ағаш құрылыс құрылғыларының массасы 400 кг тең болса. Бөлмеде 400 т каучук, 30 т мазут және 10 т полиэтилен сақталады.

Шығару

1. [17] анықтама бойынша жаңғыш заттардың төменгі массалық жану жылулықтарын анықтаймыз:

ағаш	13800 кДж·кг ⁻¹ ,
каучук	40200 кДж·кг ⁻¹ ,
полиэтилен	47100 кДж·кг ⁻¹ ,
мазут	39800 кДж·кг ⁻¹ .

2. Бөлменің еден аумағын есептейміз:

$$S_{\text{пол}} = 114,36 = 4104 \text{ м}^2.$$

3. Бөлменің өрт жүктемесін есептейміз:

$$\begin{aligned} P_{\text{пож}} &= \frac{(13,8 \cdot 0,4 + 40,2 \cdot 400 + 39,8 \cdot 30 + 47,1 \cdot 10)10^3}{4104} = \\ &= 4320 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}. \end{aligned}$$

Қорытынды: аталған бөлменің өрт жүктемесі
4320 МДж м⁻².

§ 2. Заттардың жану температурасын есептеу

Жану аумағында бөлінетін энергия жаңғыш затты жану үрдісіне дайындауға, жану өнімдерін қыздыруға және жану аумағынан қоршаған ортаға шығарылатын жылулық сәулеленуге жұмсалады.

Жану температурасы – бұл реакцияның жылу шығару әсерінен жану өнімдердің қыздырылатын температурасы.

Кирхгоф заңы:

$$\Delta H_{T_2} = \Delta H_{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} \Delta c_p dT, \quad (2.21)$$

химиялық жүйе энтальпиясының температураға тәуелділігін көрсетеді. Жану кезінде бөлінетін барлық жылу Q_n жану өнімдердің энтальпиясын жоғарлатуға жұмсалады (құрамында су молекулалары бу күйінде болатын жағдайда) деп қарастырсақ, онда жаңғыш заттың бір моль мөлшеріне:

$$Q_H = \Delta H_{T_2} - \Delta H_{T_1} = \int_{T_1}^{T_2} \Delta c_p dT. \quad (2.22)$$

Осыдан жеке заттың немесе қоспа компонентінің жану өнімдердің салыстырмалы көлемі:

$$Q_{p_{\text{пг}}} = \sum_i v_{\text{пг}i} c_p (T_{\text{гор}} - T_0), \quad (2.23)$$

мұнда $v_{\text{пг}i} - 1$ моль жаңғыш заттың жану кезінде түзілетін i жану өнімнің көлемі, м^3 ;

c_p – тұрақты қысым шартында жану өнімдердің орта көлемдік жылу сыйымдылығы, $\text{кДж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}$;

T_0 – жүйенің бастапқы температурасы, К ;

$T_{\text{гор}}$ – жану температурасы, К .

(2.23) формуладан жану температурасын анықтаймыз:

$$T_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{пг}}}{\sum_i v_{\text{пг}i} c_{p_{\text{пг}i}}} + T_0, \quad (2.24)$$

немесе тұрақты жағдайларында шығындар болмағанда:

$$T_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{н}}}{\sum_i n_{\text{пг}i} c_{p_{\text{пг}i}}} + 298, \text{ К.} \quad (2.25)$$

Жанудың шарттарына байланысты калориметриялық, адиабатикалық және нақты жану температурасын ажыратады.

Калориметриялық жану температурасы – бұл жану өнімдері қыздырылатын температура, егер келесі шарттар орындалатын болса:

- 1) реакция кезінде бөлінген жылу жану өнімдерді қыздыруға жұмсалса ($Q_{\text{пг}} = Q_{\text{н}}$);
- 2) стехиометриялық құрамды жаңғыш қоспаның толық жануы жүрсе ($\alpha = 1$);
- 3) жану өнімдердің түзілу кезінде олардың термиялық диссоциациясы жүрмесе;
- 4) бастапқы жаңғыш қоспа тұрақты жағдайларда болса (бастапқы температура 298 К, қысым 101,3 кПа).

Егер жану температурасы жоғары болса, онда реакция кезінде түзілетін жану өнімдері олардың құрайтын элементтерге ыдырауы мүмкін. Жану өнімдердің ыдырауын температура 1700°C жоғары болғанда есепке алу керек.

Жанудың теориялық температурасы – бұл қоршаған ортаға жылу шығыны болмайтын және жану өнімдердің диссоциациясына шығындалатын жылу үлесін ескерсе, жану өнімдердің қызу дәрежесі.

Адиабатикалық жану температурасы – бұл жану үрдісі ауаның артық мөлшерінде жүретін жағдайда жану өнімдердің қызу температурасы. Қоршаған ортаға жылу шығындалмайды, сондықтан жану өнімдердің және артық ауаның қызуына жанудың барлық жылуы жұмсалады. Жаңғыш қоспаның бастапқы температурасы мен қысымы тұрақты деп есептеледі.

Нақты жану температурасы – бұл нақты жағдайларда жану өнімдердің қызу температурасы. Бұл жағдайда жану үрдісі ауаның артық немесе жетіспеу жағдайында, жаңғыш заттың толық емес жануы, қоршаған ортаға жылудың шығындарымен, жаңғыш заттың бастапқы шарттары тұрақты жағдайлардан айырылуы мүмкін.

Нақты жану температурасы адиабатикалық температурадан әрдайым төмен, бірақ ол калориметриялық жану температурасымен және жылу беру шарттарымен анықталады.

Тәжірибеде жану аумағында қыздырылған заттардың

түсінен жану температурасын анықтайды. Сәулелену спектрінің өзгеруі қыздырылған дененің температурасына байланысты. Дененің температурасы неғұрлым жоғары болса, сәулеленудің қарқындылығы мен жарықтығы жоғары болады. Осы ереженің негізінде жанудың жарықтық температурасын анықтауға болады. Қыздырылған денелердің түсі туралы мәліметтер 1.3 кестеде келтірілген.

Тәжірибелік түрде көптеген заттардың жану температурасын анықтау қиын. Ол үшін тәжірибені жоғары температурада жүргізу қажет, сонымен қатар химиялық айналым күйінде болатын газдың температурасын өлшеу керек. Бірақ энергия сақталу және заттың химиялық құрамы заңдарын ескеріп, нақты адиабатикалық жану температурасын нақты есептеуге болады. Адиабатикалық жану температурасын есептеудің екі әдісі бар: 1) жану өнімдердің энтальпиясы бойынша; 2) жану өнімдердің жылу сыйымдылығы мен олардың температуралары арасындағы байланысты қолдану арқылы.

Жану температурасын анықтаудың

тәжірибелік маңызы

4. Газдардың жылулық кеңеюіне байланысты берілген атмосфералық қысымда жану реакция кезіндегі жану өнімдердің көлемі жану температурасымен анықталады.

5. Жану температурасы жарылыстың максималды қысымын және бөлмедегі өрттің даму параметрлерін (өрт температурасын және бейтарапты аумақ биіктігін) анықтайды.

6. Заттар мен материалдардың жану температурасына байланысты берілген жағдайларда қолдануға мүмкіндігі бар өрт сөндіру заттарын таңдайды және бөлмедегі өртті көлемдік сөндіру кезінде жанбайтын газдың шығынын есептейді.

§ 2.1. Жану өнімдердің энтальпиясын қолданып, адиабатикалық жану температурасын есептеу

Жеке заттардың адиабатикалық жану температурасын есептеу әдістемесі

1. Жану реакцияның теңдеуін құрастыру, стехиометриялық коэффициент β анықтау.

2. (1.12) формула бойынша жануға қажетті ауаның салыстырмалы теориялық моль санын $n^0_{\text{в}}$ есептеу.

3. (1.15) формула бойынша артық ауа мөлшерін есепке алып, жану өнімдердің салыстырмалы нақты моль санын $n_{\text{пг}}$ есептеу.

4. Анықтама мәліметтері арқылы заттың төменгі жану жылулығын анықтау $Q_{\text{н}}$ немесе (2.14) формула бойынша есептеу.

5. Жану өнімдердің орташа жылулығын есептеу $Q_{\text{р,ср}}$:

$$Q_{\text{р,ср}} = \frac{Q_{\text{н}}}{n_{\text{пг}}}, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (2.26)$$

6. Жану өнімдердің орташа жылулығын $Q_{\text{р,ср}}$ азоттың молярлық энтальпия мәнімен салыстыру арқылы бірінші жақындатудағы T_1 жану температурасын анықтау (қосымшаның 1 кестесі).

7. қосымшаның 1 кестесінде келтірілген жану өнімдердің энтальпия мәндерін қолданып, T_1 жану температурасында жану өнімдердің жылулығын формула бойынша есептеу:

$$Q_{p_{\text{пр}}}^{T_1} = \sum_i \left(\Delta H_{\text{пр}i}^{T_1} \cdot n_{\text{пр}i} \right), \text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1} \quad (2.27)$$

8. Екінші жақындатудағы T_2 жану температурасын анықтау: $T_2 > T_1$, егер $Q_{p_{\text{пр}}}^{T_1} < Q_{\text{н}}$, немесе $T_2 < T_1$, егер $Q_{p_{\text{пр}}}^{T_1} > Q_{\text{н}}$.

9. Формула бойынша T_2 температурада жану өнімдердің жылулығын есептеу:

$$Q_{p_{\text{пр}}}^{T_2} = \sum_i \left(\Delta H_{\text{пр}i}^{T_2} \cdot n_{\text{пр}i} \right), \text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (2.28)$$

10. Формула бойынша сызба интерполяциялау әдісімен жану температурасын есептеу:

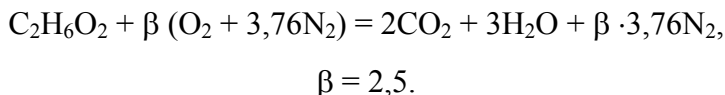
$$T_{\text{ад}} = T_1 + \frac{(T_2 - T_1) \cdot (Q_{\text{н}} - Q_{p_{\text{пр}}}^{T_1})}{(Q_{p_{\text{пр}}}^{T_2} - Q_{p_{\text{пр}}}^{T_1})}, \text{К}. \quad (2.29)$$

Есеп шығару мысалы

Этиленгликольдің $C_2H_6O_2$ адиабатикалық жану температурасын анықтаңыз, егер оның түзілу жылулығы $\Delta H_f^0 = -453,8$ кДж·моль⁻¹, ал жану ауаның ратық коэффициенті $\alpha = 1,8$ болған жағдайда жүрсе.

Шығару

1. Жану реакцияның теңдеуін құрастырамыз:



2. Ауаның салыстырмалы теориялық моль санын есептейміз:

$$n_B^0 = 4,76 \cdot 2,5 = 11,9 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Жану өнімдердің салыстырмалы нақты моль санын есептейміз:

$$n_{III} = 2 + 3 + 2,5 \cdot 3,76 + (1,8 - 1) \cdot 11,9 = 23,9 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}$$

4. Гесс заңы бойынша заттың төменгі молярлық жану жылулығын есептейміз:

$$Q_H = |(-393,8) \cdot 2 + (-241,8) \cdot 3 - (-453,8)| = 1059,3 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

5. (2.26) формула бойынша жану өнімдердің орташа жылулығын есептейміз:

$$Q_{P_{\text{ср}}} = \frac{1059,3}{23,9} = 44,3 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

6. Азоттың молярлық энтальпиясын негізге алып, қосымшаның 1 кестесі бойынша бірінші жақындатуда $T_1 = 1400 \text{ К}$ жану температурасын анықтаймыз.

7. 1400 К температурада әрбір жану өнімнің энтальпиясын анықтаймыз және (2.27) формула бойынша жану өнімдердің жылулығын есептейміз:

$$\Delta H_{\text{CO}_2}^{T_1} = 65,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T_1} = 53,5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\Delta H_{\text{N}_2}^{T_1} = 43,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad \Delta H_{\text{B}}^{T_1} = 44 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\begin{aligned} Q_{P_{\text{шт}}}^{T_1} &= 2 \cdot 65,2 + 3 \cdot 53,5 + 2,5 \cdot 3,76 \cdot 43,6 + (1,8 - 1)11,9 \cdot 44 = \\ &= 1119,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \end{aligned}$$

8. Екінші жақындатудағы жану температурасын анықтау. $T_1 = 1400$ К температурадағы жану өнімдердің жылулығы $T_2 = 1200$ К температурадағы төменгі жану жылулығы мәнінен жоғары болғандықтан кейін, оны қабылдаймыз.

9. 1200 К температурада жану өнімдердің энтальпиясын анықтаймыз және (2.28) формула бойынша жану өнімдердің жылулығын есептейміз:

$$\Delta H_{\text{CO}_2}^{T_2} = 53,8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T_2} = 44,5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\Delta H_{\text{N}_2}^{T_2} = 36,8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad \Delta H_{\text{B}}^{T_2} = 37,1 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{рпг}}^{T_2} &= 2 \cdot 53,8 + 3 \cdot 44,5 + 2,5 \cdot 3,76 \cdot 36,8 + (1,8 - 1)11,9 \cdot 37,1 = \\ &= 940,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \end{aligned}$$

10. Сызба интерполяциялау әдісімен жану температурасын есептейміз:

$$T_{\text{ад}} = 1400 + \frac{(1200 - 1400)(1059,3 - 1119,6)}{940,2 - 1119,6} = 1333 \text{ К.}$$

Қорытынды: берілген жағдайда этиленгликольдің адиабатикалық жану температурасы 1333 К.

Күрделі заттардың адиабатикалық жану температурасын есептеу әдістемесі

1. Артық ауа мөлшерін есепке алып, күрделі заттың жану өнімдердің салыстырмалы көлемін анықтау.

1.1. (1.22) немесе (1.28) формулалар бойынша сәйкес 1 м^3 газ қоспаның немесе 1 кг жаңғыш заттың жануына қажетті салыстырмалы теориялық ауа көлемін есептеу.

1.2. Жаңғыш заттың агрегаттық күйіне байланысты 1.5 немесе 1.6 кестелерін қолданып, (1.36) формула бойынша жану өнімдердің салыстырмалы теориялық көлемін $v_{\text{пт}}^{\circ}$ есептеу.

1.3. (1.25) формула бойынша артық ауа мөлшерін есепке алып, жану өнімдердің салыстырмалы нақты көлемін есептеу.

2. Заттың төменгі жану жылулығын анықтамадан алу немесе (2.19) Менделеев теңдеуі бойынша есептеу немесе (2.17) формула бойынша газ қоспаның көлемдік жану жылулығын есептеу.

3. (2.26) формулаға сәйкес төменгі массалық жылулықтың жану өнімдердің салыстырмалы нақты көлеміне қатынасы ретінде жану өнімдерінің орташа жылулығын $Q_{p_{cp}}$ есептеу.

4. Жану өнімдерінің орташа жылулығын $Q_{p_{cp}}$ азоттың көлемдік салыстырмалы энтальпиясымен (қосымшаның 2 кестесі) салыстыру арқылы бірінші жақындатудағы T_1 температурада жану температурасын анықтау.

5. T_1 температурада жану өнімдердің осы температураға сәйкес салыстырмалы көлемдік энтальпия мәндерін қолданып, келесі формула бойынша жану өнімдердің жылулығын есептеу:

$$Q_{p_{пг}}^{T_1} = \sum_i \left(\Delta H_{пг_i}^{T_1} v_{пг_i} \right) \quad (2.30)$$

6. Екінші жақындатудағы T_2 жану температурасын анықтау: $T_2 > T_1$, егер $Q_{p_{пг}}^{T_1} < Q'_H (Q''_H)$, немесе $T_2 < T_1$, егер $Q_{p_{пг}}^{T_1} > Q'_H (Q''_H)$.

7. Келесі формула бойынша T_2 температурада жану өнімдердің жылулығын есептеу:

$$Q_{p_{\text{пг}}}^{T_2} = \sum_i \left(\Delta H_{\text{пг}_i}^{T_2} v_{\text{пг}_i} \right) \quad (2.31)$$

8. (2.29) формула бойынша сызба интерполяциялау әдісімен жану температурасын есептеу.

Есеп шығару мысалы

Құрамы: С – 46 %, Н – 5,5 %, О – 39,2 %, N – 0,9 %, ылғал W – 7 %, күл А – 1,4 % болатын ағаштың жану температурасын есептеу. Жану үрдісі артық ауа коэффициенті $\alpha = 1,5$ және тұрақты жағдайда жүрді.

Шығару

1. Ауаның артық мөлшерін есепке алып, құрамы берілген ағаштың жану өнімдерінің салыстырмалы нақты көлемін анықтаймыз.

1.1. (1.35) формула бойынша ағаштың жануына қажетті ауаның салыстырмалы теориялық көлемін есептейміз:

$$v_{\text{B}}^0 = 0,29 \left(\frac{46}{3} + 5,5 - \frac{39,2}{8} \right) = 4,6 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

1.2. 1.6 кестенің мәліметтерін қолданып, тұрақты жағдайларында әрбір жану өнімнің салыстырмалы көлемін анықтаймыз және құрамы берілген ағаштың жану өнімдерінің салыстырмалы теориялық көлемін есептеу. Біңғайлық үшін кесте құрастырамыз.

Элемент	Элементтің массалық үлесі, g	Жану өнімдердің көлемі, $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$		
		CO_2	H_2O	N_2
C	0,46	$0,46 \cdot 2,03$		$0,46 \cdot 7,65$
H	0,055		$0,055 \cdot 12,2$	$0,055 \cdot 22,9$
N	0,009			$0,009 \cdot 0,87$
O	0,392			$0,392 \cdot (-2,87)$
W	0,07		$0,07 \cdot 1,36$	
Барлығы	0,986	0,93	0,77	3,66

$$v_{\text{шт}}^0 = 0,93 + 0,77 + 3,66 = 5,36 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

1.3. Артық ауа мөлшерін есепке алып, жану өнімдердің салыстырмалы нақты көлемін есептейміз:

$$v_{\text{шт}} = 5,36 + (1,5 - 1) \cdot 4,6 = 7,7 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

2. Менделеев формуласынан ағаштың төменгі массалық жылулығын есептеу:

$$Q'_H = 339,4 \cdot 46 + 1256,8 \cdot 5,5 - 108,9(39,2 + 0,9) - 25,1 \cdot (9 \cdot 5,5 + 7) = 16739,8 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

3. Жану өнімдердің орташа жылулығын есептейміз:

$$Q_{p,cp} = \frac{16739,8}{7,7} = 2185 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

4. Азоттың салыстырмалы көлемдік энтальпиясына қарап, бірінші жақындатудағы $T_1 = 1600 \text{ К}$ жану температурасын анықтаймыз.

5. 1600 К температурада жану өнімдердің көлемдік энтальпиясын 2 кестеден анықтаймыз және (2.30) формула бойынша жану өнімдердің жылулығын есептейміз:

$$\Delta H_{\text{CO}_2}^{T_1} = 3430,2 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \quad \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T_1} = 2809,9 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\Delta H_{\text{N}_2}^{T_1} = 2257,0 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \quad \Delta H_{\text{B}}^{T_1} = 2278,0 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q_{\text{рпг}}^{T_1} = 0,93 \cdot 3430,2 + 0,77 \cdot 2809,9 + 3,66 \cdot 2257,0 + \\ + (1,5 - 1)4,6 \cdot 2278,0 = 18853,5 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

6. Екінші жақындатуда жану температурасын анықтаймыз. 1600 К температурада жану өнімдердің жылулығы: $18853,5 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$; бұл заттың жану жылулығынан $16739,8 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ көп, сондықтан екінші жақындатудағы температура мәндерін $T_1: T_2 = 1400 \text{ К}$ төмен етіп аламыз.

7. 1400 К температурада жану өнімдердің көлемдік энтальпиясын анықтаймыз және (2.31) формула бойынша жану өнімдердің жылулығын есептейміз:

$$\Delta H_{\text{CO}_2}^{T_2} = 2909,0 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \quad \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T_2} = 2387,8 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\Delta H_{\text{N}_2}^{T_2} = 1946,0 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \quad \Delta H_{\text{B}}^{T_2} = 1963,4 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q_{\text{рпг}}^{T_2} = 0,93 \cdot 2909,0 + 0,77 \cdot 2387,8 + \\ + 3,66 \cdot 1946,0 + (1,5 - 1)4,6 \cdot 1963,4 = 16200,8 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

8. Сызба интерполяциялау әдісімен жану температурасын анықтау:

$$T_{\text{гор}} = 1600 + \frac{(1400 - 1600)(16739,8 - 18853,5)}{(16200,8 - 18853,5)} = 1440 \text{ К.}$$

Қорытынды: тұрақты жағдайда құрамы берілген ағаштың адиабатикалық жану температурасы 1440 К.

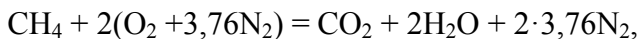
Есеп шығару мысалы

Құрамы: $\text{CH}_4 - 50\%$; $\text{C}_2\text{H}_6 - 30\%$; $\text{N}_2 - 17\%$; $\text{CO}_2 - 3\%$ болатын және жылу шығынысыз жанатын газ қоспаның жану температурасын анықтау, егер қалыпты жағдайда артық ауа коэффициенті $\alpha = 1,8$.

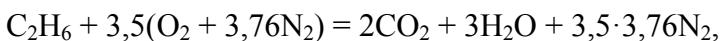
Шығару

1. Артық ауа мөлшерін есепке алып, жану өнімдердің салыстырмалы көлемін анықтаймыз.

1.1. (1.32) формула бойынша 1 м^3 газ қоспаның жануына қажетті салыстырмалы теориялық ауа көлемін v_{B}^0 есептейміз. Алдымен қоспа құрамындағы жаңғыш компоненттерінің жану реакция теңдеуін құрастырамыз:



$$\beta = 2;$$



$$\beta = 3,5;$$

$$v_{\text{всм}}^0 = \frac{2 \cdot 50 + 3,5 \cdot 30}{21} = 9,76 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

1.2. Газ қоспаның құрамын және 1.5 кестеде келтірілген коэффициенттерді есепке алып, (1.33) формула бойынша жану өнімдердің салыстырмалы теориялық көлемін $v_{\text{пт}}^0$ есептейміз. Ыңғайлық үшін кесте құрастырамыз:

Қоспа компоненті	Көлемдік үлесі	Жану өнімнің көлемі, $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$		
		CO ₂	H ₂ O	N ₂
CH ₄	0,5	1·0,5	2·0,5	7,52·0,5
C ₂ H ₆	0,3	2·0,3	3·0,3	13,16·0,3
N ₂	0,17	–	–	0,17
CO ₂	0,03	0,03	–	–
барлығы	1,0	1,13	1,9	7,88

$$v_{\text{птсм}}^0 = 1,13 + 1,9 + 7,88 = 10,9 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

1.3. (1.25) формула бойынша артық ауа мөлшерін есепке алып, жану өнімдердің салыстырмалы нақты көлемін есептейміз:

$$v_{\text{штсм}} = 10,9 + (1,8 - 1) \cdot 9,76 = 18,7 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

2. (2.17) формула бойынша газ қоспаның төменгі көлемдік жану жылулығын есептейміз. 2.2 кестесінен қоспа компоненттерінің төменгі көлемдік жану жылулықтарын анықтаймыз:

$$Q''_{\text{нCH}_4} = 35880 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \quad Q''_{\text{нC}_2\text{H}_6} = 64360 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q''_{\text{нсм}} = 35880 \cdot 0,5 + 64360 \cdot 0,3 = 37248 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Жану өнімдердің орташа жылулығын есептейміз $Q_{\text{ср}}$:

$$Q_{\text{ср}} = \frac{37248}{18,7} = 1992 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

4. Азоттың салыстырмалы көлемдік энтальпиясына (қосымшаның 2 кестесі) қарап, бірінші жақындатудағы $T_1 = 1400 \text{ К}$ жану температурасын анықтаймыз.

5. Қосымшаның 2 кестесінен 1400 К температурада жану өнімдердің көлемдік энтальпиясын анықтаймыз және (2.30) формула бойынша осы температурада жану өнімдердің жылулығын есептейміз.

$$\Delta H_{\text{CO}_2}^{T_1} = 2909,0 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \quad \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T_1} = 2387,8 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\Delta H_{\text{N}_2}^{T_1} = 1946,0 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \quad \Delta H_{\text{B}}^{T_1} = 1963,4 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q_{\text{ршт}}^{T_1} = 1,13 \cdot 2909,0 + 1,9 \cdot 2387,8 + 7,88 \cdot 1946,0 + (1,8 - 1)9,76 \cdot 1963,4 = 38488,7 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

6. Екінші жақындатуда жану температурасын анықтаймыз. 1400 К температурада жану өнімдердің жылулығы 38488,7 кДж·м⁻³; бұл газ қоспасының төменгі жану жылулығынан 37248 кДж·м⁻³ көп, сондықтан екінші жақындатудағы температураның мәнін T₂ = 1200 К төмен етіп аламыз.

7. 1200 К температурада жану өнімдердің көлемдік энтальпиясын анықтаймыз және жану өнімдердің жылулығын есептейміз:

$$\Delta H_{\text{CO}_2}^{\text{T}_2} = 2399,4 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \quad \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{T}_2} = 1984,8 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\Delta H_{\text{N}_2}^{\text{T}_2} = 1641,2 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}; \quad \Delta H_{\text{B}}^{\text{T}_2} = 1655,1 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$Q_{\text{ршт}}^{\text{T}_2} = 1,13 \cdot 2399,4 + 1,9 \cdot 1984,8 + 7,88 \cdot 1641,2 + (1,8 - 1)9,76 \cdot 1655,1 = 32338,1 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

8. Сызба интерполяциялау әдісін қолданып, жану температурасын есептейміз:

$$T_{\text{ад}} = 1400 + \frac{(1200 - 1400) \cdot (37248 - 38489)}{(32338 - 38489)} = 1360 \text{ К}.$$

Қорытынды: берілген жағдайларда және берілген құрамы бойынша газ қоспаның жану температурасы 1360 К.

**§ 2.2. Жану өнімдердің жылу сыйымдылығын ескеріп,
жану температурасын анықтау**

(2.25) формула бойынша жану өнімдердің жылу сыйымдылығы мен олардың температурасы арасындағы байланысты қолданып, жеке заттар мен құрамы күрделі заттардың жану температурасын есептеуге болады.

Жану өнімдер қоспасының орташа жылу сыйымдылық пен олардың температурасынан байланысын келесі теңдеумен көрсетеді:

$$c_p = a_{cm} + b_{cm}t, \quad (2.32)$$

мұнда a_{cm} , b_{cm} – жану өнімдердің құрамына байланысты анықталатын тұрақты мәндер;

t – жану өнімдердің температурасы, °C.

(2.32) теңдеудің тұрақты a_{cm} , b_{cm} мәндерін жану өнімдердің i компонентінің моль сандарын сәйкес келетін a_i және b_i константаларына көбейтіндісінің қосындысы ретінде есептейді (қосымшаның 4 кестесінен алады):

$$a_{cm} = \sum_i \left(a_i + \frac{b_i T_{CT}}{2} \right) n_{пгi}; \quad (2.33)$$

$$b_{cm} = \sum_i \frac{b_i}{2} n_{пгi}. \quad (2.34)$$

Формула бойынша жану температурасын есептейді:

$$t_{\text{гор}} = \frac{-a_{\text{см}} + \sqrt{a_{\text{см}}^2 + 4b_{\text{см}}Q_{\text{н}}}}{2b_{\text{см}}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.35)$$

мұнда $Q_{\text{н}}$ – заттың төменгі салыстырмалы жану жылулығы (жану өнімдердің мөлшеріне байланысты молярлық, массалық немесе көлемдік).

Жеке заттардың жану өнімдерінің жылу сыйымдылығын ескеріп, жану температурасын есептеу әдістемесі

1. Артық ауа мөлшерін ескеріп, жану өнімдердің құрамын және салыстырмалы моль санын анықтау.
2. Заттың төменгі тұрақты жану жылулығын анықтау.
3. (2.36) теңдеудің a_i және b_i константаларын әрбір жану өнімі үшін қосымшаның 4 кестесінен анықтайды.
4. (2.33), (2.34) формулалар бойынша жану өнімдер қоспасы үшін $a_{\text{см}}$ және $b_{\text{см}}$ константаларын есептеу.

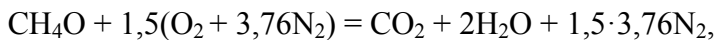
5. (2.35) формула бойынша жану температурасын есептеу.

Есеп шығару мысалы

Метанол буларының адиабатикалық жану температурасын есептеңіз, егер жану артық ауа коэффициенті $\alpha = 1,7$ жүрсе..

Шығару

1. Жану өнімдердің салыстырмалы моль санын және артық ауа коэффициентін ескеріп, олардың құрамын анықтаймыз:



$$\beta = 1,5;$$

$$n_{\text{CO}_2} = 1 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad n_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$n_{\text{N}_2} = 1,5 \cdot 3,76 = 5,64 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\Delta n_{\text{в}} = (1,7 - 1)1,5 \cdot 4,76 = 5,0 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

2. Түзілу жылулығы минус $239,0 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ болатын ескеріп, метанолдың тұрақты төменгі жану жылулығын есептейміз:

2 тарау. Жану үрдісінің энергетикалық теңгерімі

$$Q_H = |1 \cdot (-393,5) + 2 \cdot (-241,8) - (-239,0)| = 638,5$$

$$\text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Қосымшаның 4 кестесінен әрбір жану өнімі үшін (2.37) теңдеудегі a_i және b_i константаларын анықтаймыз (заттардың молярлық жылу сыйымдылығын қолданамыз)

және $a' = a + \frac{bT_{CT}}{2}$, $b' = \frac{b}{2}$ мәндерін есептейміз:

Зат	a_i	a'_i	b_i	b'_i
ауа	28,62	29,23	$4,08 \cdot 10^{-3}$	$2,04 \cdot 10^{-3}$
N ₂	27,87	28,54	$4,27 \cdot 10^{-3}$	$2,135 \cdot 10^{-3}$
CO ₂	44,14	45,49	$9,04 \cdot 10^{-3}$	$4,52 \cdot 10^{-3}$
H ₂ O (газ)	30,00	31,59	$10,71 \cdot 10^{-3}$	$5,355 \cdot 10^{-3}$

4. a_{CM} және b_{CM} константаларын есептейміз:

Зат	$a'_i n_{ПГ_i}$	$b'_i n_{ПГ_i}$
ауа	$29,23 \cdot 5,0$	$2,030 \cdot 10^{-3} \cdot 5,0$
N ₂	$28,54 \cdot 5,64$	$2,135 \cdot 10^{-3} \cdot 5,64$
CO ₂	$45,49 \cdot 1$	$4,520 \cdot 10^{-3} \cdot 1$
H ₂ O (г)	$31,59 \cdot 2$	$5,355 \cdot 10^{-3} \cdot 2$
жану өнімдердің қоспасы	$a_{CM} = 415,8$	$b_{CM} = 37,5 \cdot 10^{-3}$

5. Жану температурасын есептеу:

$$t_{\text{гор}} = \frac{-415,8 + \sqrt{415,8^2 + 4 \cdot 37,5 \cdot 10^{-3} \cdot 638,5 \cdot 10^3}}{2 \cdot 37,5 \cdot 10^{-3}} = 1367^\circ\text{C}.$$

Қорытынды: берілген шартында метанол буларының адиабатикалық жану температурасы 1367°C .

Күрделі заттар үшін жану өнімдердің молярлық жылу сыйымдылығын қолданып, жану температурасын есептеу әдістемесі

1. 1 м^3 газ қоспаның немесе 1 кг жаңғыш материалдың жануына қажетті салыстырмалы теориялық ауа көлемін $v_{\text{В}}^\circ$, есептеу, сәйкес (1.32) немесе (1.34) формулалар бойынша.

2. Жаңғыш заттың агрегаттық күйіне байланысты 1.5 немесе 1.6 кестелерді қолданып, жану өнімдердің салыстырмалы теориялық көлемдерін анықтау.

3. Артық ауа коэффициентін ескеріп, әрбір жану өнімнің салыстырмалы нақты көлемін анықтау.

4. Анықтама мәліметтері бойынша немесе (2.19) теңдеу бойынша заттың төменгі массалық жану жылулығын анықтау немесе (2.17) формула бойынша газ қоспаның көлемдік жану жылулығын есептеу.

5. Қосымшаның 4 кестесі бойынша әрбір жану өнімі үшін (газдардың көлемдік жылу сыйымдылығын қолдану).

6. (2.33), (2.34) формулалар бойынша жану өнімдер қоспасы үшін a_{cm} және b_{cm} константаларын есептеу.

7. (2.35) формула бойынша жану температурасын есептеу.

Есеп шығару мысалы

Құрамы: С – 83 %, Н – 15 %, S – 1 %, N – 1 % дизель жанармайының жану температурасын есептеу. Жану қалыпты жағдайда артық ауа коэффициенті $\alpha = 1,4$. Жану кезінде жану жылулығының 25 % қоршаған ортаға шығындалды және толық жану өнімдері пайда болды.

Шығару

1. (1.34) формула бойынша 1кг дизель жанармайдың жану үшін қажетті салыстырмалы теориялық ауа көлемін есептейміз:

$$v_B^o = \frac{4,76 \cdot 22,4}{4 \cdot 100} \left(\frac{83}{3} + 15 - \frac{0-1}{8} \right) = 11,4 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

2. 1.6 кестеде келтірілген коэффициенттер мен зат құрамын есепке алып, жану өнімдердің салыстырмалы көлемдерін анықтаймыз. Ол үшін кесте құрастырамыз:

Элемент	Массалық үлесі	Жану өнімдердің көлемі, м ³ ·кг ⁻¹			
		CO ₂	H ₂ O	SO ₂	N ₂
C	0,83	0,83·1,87			0,83·7,0
H	0,15		0,15·11,2		0,15·21,1
S	0,01			0,01·0,7	0,01·2,63
N	0,01				0,01·0,8
Барлығы	1,00	1,55	1,68	0,007	9,0

3. Артық ауа мөлшерін есепке алып, әрбір жану өнімдердің салыстырмалы көлемін есептейміз:

$$v_{\text{CO}_2} = 1,55 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1};$$

$$v_{\text{N}_2} = 9,0 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1};$$

$$v_{\text{H}_2\text{O}} = 1,68 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1};$$

$$v_{\text{SO}_2} = 0,007 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1};$$

$$\Delta v_{\text{в}} = (1,4 - 1) \cdot 11,4 = 4,56 \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}.$$

4. Құрамы берілген дизель жанармайының төменгі массалық жану жылулығын есептейміз:

$$Q'_{\text{н}} = 339,4 \cdot 83 + 1256,8 \cdot 15 - 108,9(1 - 1) - 25,1 \cdot 9 \cdot 15 = 43633,7 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

Жану өнімдерін қыздыру үшін төменгі массалық жану жылулықтың 75 % жұмсалды:

$$Q'_{\text{пт}} = 0,75 \cdot 43633,7 = 32725,3 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

5. Қосымшаның 4 кестесінен әрбір жану өнімі үшін (2.38) теңдеудегі a_i және b_i константаларын анықтаймыз (газдардың көлемдік жылу сыйымдылығын қолданамыз)

және $a' = a + \frac{b\Gamma_{CT}}{2}$, $b' = \frac{b}{2}$ мәндерін есептейміз:

Зат	a_i	a'_i	b_i	b'_i
ауа	1172,95	1197,86	$167,21 \cdot 10^{-3}$	$83,6 \cdot 10^{-3}$
N_2	1142,21	1168,28	$175,00 \cdot 10^{-3}$	$87,5 \cdot 10^{-3}$
CO_2	1809,02	1864,22	$370,49 \cdot 10^{-3}$	$185,25 \cdot 10^{-3}$
H_2O (газ)	1229,51	1294,91	$438,93 \cdot 10^{-3}$	$219,47 \cdot 10^{-3}$
SO_2	1743,85	1820,49	$514,34 \cdot 10^{-3}$	$257,17 \cdot 10^{-3}$

6. $a_{сум}$ және $b_{сум}$ константаларын есептейміз.

Зат	$a_i \cdot v_{пр_i}$	$b_i \cdot v_{пр_i}$
ауа	$1197,86 \cdot 4,56$	$83,6 \cdot 10^{-3} \cdot 4,56$
N_2	$1168,28 \cdot 9,0$	$87,5 \cdot 10^{-3} \cdot 9,0$
CO_2	$1864,22 \cdot 1,55$	$185,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,55$
H_2O (г)	$1294,91 \cdot 1,68$	$219,47 \cdot 10^{-3} \cdot 1,68$
SO_2	$1820,49 \cdot 0,007$	$257,17 \cdot 10^{-3} \cdot 0,007$
жану өнімдердің қоспасы	$a_{сум} = 21054,5$	$b_{сум} = 1826,4 \cdot 10^{-3}$

7. (2.35) формула бойынша жану температурасын есептейміз:

$$t_{\text{гор}} = \frac{-210545 + \sqrt{210545^2 + 4 \cdot 18264 \cdot 327253 \cdot 10^3}}{2 \cdot 18264 \cdot 10^{-3}} = 1388 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Қорытынды: берілген жағдайларда дизель жанармайдың жану температурасы 1388 °С.

§ 2.3. Шектелген кеңістікте диффузионды жану температурасын есептеу

Заттар мен материалдардың шектеулі кеңістікте диффузионды жануы ауаның жану өнімдерімен араласу арқылы жүреді. Газ-ауа қоспада (ауа мен жану өнімдердің қоспасы) оттегінің концентрациясының 14 - 16 % дейін төмендеу шартында жалынды диффузионды жану тоқтайтыны белгілі.

Шектеулі кеңістікте диффузионды жану кезінде артық ауа коэффициентін келесі формула бойынша есептейді:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{\text{O}_2}}, \quad (2.39)$$

мұнда φ_{O_2} – бөлмедегі газ-ауа қоспаның

құрамындағы оттегінің көлемдік концентрациясы, %.

Шектеулі кеңістікте диффузионды жану кезінде артық ауаның болуы жаңғыш заттың толық жану өніміне дейін жануын және олардың қызу дәрежесін анықтайды. Кеңістікте диффузионды жану температурасын түтін газдарының жылу сыйымдылықтарының температурадан тәуелділігін қолданып, немесе жану өнімдердің энтальпиясын қолданып, сызба интерполяциялау әдісімен есептейді. Ол үшін алдымен (2.39) формула бойынша жану өнімдер құрамында оттегінің мөлшері бойынша артық ауаның нақты коэффициентін анықтау керек, кейін алдында келтірілген әдістер бойынша есептеуді қайталау керек.

Есеп шығару мысалы

Спирт зауытының жұмыс цехында жаңғыш сұйықтың апаттық төгілу нәтижесінде жану пайда болды. Этанолдың диффузионды жалын температурасын есептеу, егер бөлмедегі оттегінің концентрациясы 13 %, ал жану аумағында бөлінген жылудың жалпы мөлшерінен 20 % қоршаған ортаға шығындалса. Бастапқы шарттар тұрақты

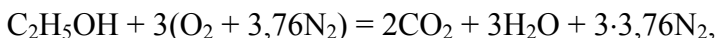
деп есептеу керек. Тек толық жану өнімдері түзілді деп қарастыру.

Шығару

1. Цех бөлмесінде диффузионды жану кезінде артық ауа коэффициентін есептейміз:

$$\alpha = \frac{21}{21-13} = 2,6.$$

2. Артық ауа мөлшерін есепке алып, этанолдың жану өнімдердің құрамын және салыстырмалы моль санын анықтаймыз:



$$\beta = 3;$$

$$n_{\text{CO}_2} = 2 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad n_{\text{H}_2\text{O}} = 3 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$n_{\text{N}_2} = 3 \cdot 3,76 = 11,28 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\Delta n_{\text{в}} = (2,6 - 1) \cdot 3 \cdot 4,76 = 22,8 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. (2.14) Гесс заңы бойынша этанолдың түзілу жылулығы минус 234,9 кДж·моль⁻¹ болатын этанолдың төменгі тұрақты жану жылулығын есептейміз:

$$Q_H = |2 \cdot (-393,5) + 3 \cdot (-241,8) - (-234,9)| = 1278,2$$

$$\text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

4. Қосымшаның 4 кестесі бойынша әрбір жану өнімнің теңдеудегі константаларын $c_{p_i} = a_i + b_i \cdot t$ анықтаймыз (заттардың молярлық жылу сыйымдылығын қолданамыз) және $a' = a + \frac{bT_{CT}}{2}$, $b' = \frac{b}{2}$ мәндерін есептейміз:

Зат	a_i	a'_i	b_i	b'_i
ауа	28,62	29,23	$4,08 \cdot 10^{-3}$	$2,04 \cdot 10^{-3}$
N_2	27,87	28,54	$4,27 \cdot 10^{-3}$	$2,135 \cdot 10^{-3}$
CO_2	44,14	45,49	$9,04 \cdot 10^{-3}$	$4,52 \cdot 10^{-3}$
H_2O (газ)	30,00	31,59	$10,71 \cdot 10^{-3}$	$5,355 \cdot 10^{-3}$

5. a_{CM} және b_{CM} константаларын есептейміз:

Зат	$a'_i n_{пг_i}$	$b'_i n_{пг_i}$
ауа	$29,23 \cdot 22,8$	$2,030 \cdot 10^{-3} \cdot 22,8$
N_2	$28,54 \cdot 11,28$	$2,135 \cdot 10^{-3} \cdot 11,28$
CO_2	$45,49 \cdot 2$	$4,520 \cdot 10^{-3} \cdot 2$
H_2O (г)	$31,59 \cdot 3$	$5,355 \cdot 10^{-3} \cdot 3$
жану өнімдердің қоспасы	$a_{CM} = 1174,1$	$b_{CM} = 95,5 \cdot 10^{-3}$

6. Жылу шығындарын ескеріп, (2.35) формула бойынша жану температурасын есептейміз.

Есеп шарты бойынша $Q_{\text{пот}} = 0,2Q_{\text{н}}$, сондықтан, жану өнімдердің қыздыруына шығындалады:

$$Q_{\text{пт}} = Q_{\text{н}} - Q_{\text{пот}} = Q_{\text{н}} \cdot (1 - 0,2) = 0,8Q_{\text{н}};$$
$$t_{\text{гор}} = \frac{-1174 + \sqrt{1174^2 + 4 \cdot 0,095 \cdot 0,8 \cdot 1278,2 \cdot 10^3}}{2 \cdot 0,095} = 1007^{\circ}\text{C}$$

Қорытынды: берілген жағдайларда этанолдың жану температурасы 1007°C .

§ 3. Бу-ауа және газ-ауа қоспаның жарылыс
температурасын есептеу

Газ-ауа және бу-ауа қоспаның кинетикалық жануы өте жоғары жылдамдықпен жүреді. Жаңғыш қоспа реакция өнімдердің жылулық кеңеюі болғанша дейін толық жанып кетеді. Сондықтан, жарылыс кезінде жану реакциясы тұрақты көлемде өтеді деп қарастыруға болады. Осыған байланысты жану өнімдері екі сатыда қыздырылады: химиялық реакцияның жылу бөліну нәтижесінде және адиабатикалық құсыру нәтижесінде.

Термодинамиканың бірінші заңына сәйкес, жүйеде бөлінетін жылу мөлшері: $dQ = dU + PdV = dH - VdP$ құрайды, немесе тұрақты көлемде: $dU = dH - VdP$. (2.7), (2.8) формулаларына сәйкес және идеалды газдың күйін сипаттайтын теңдеуді қайта жазамыз:

$$-Q_v = -Q_p - \Delta nRT_0 \text{ немесе } Q_{взр} = Q_n + \Delta nRT_0. \quad (2.40)$$

мұнда Q_p – тұрақты қысым шартында реакция жылулығы;

Q_v – тұрақты көлем шартында реакция жылулығы;

$Q_{взр}$ – жарылыс кезінде бөлінетін жылу;

Q_H – жаңғыш заттың төменгі жану жылулығы;

$R = 8,3 \cdot 10^{-3}$ кДж·моль⁻¹·К⁻¹ – эмбебап газ тұрақтысы;

T_0 – бастапқы қоспаның бастапқы температурасы, К;

Δn – бастапқы жаңғыш қоспа $n_{гс}$ және жану өнімдердің $n_{пг}$ моль сандары арасындағы айырмашылық.

Жарылыс кезінде бөлінетін барлық ішкі энергия мөлшері (жарылыс энергиясы $Q_{взр}$) жану өнімдердің ішкі энергиясын жоғарлатуға жұмсалады, яғни:

$$Q_{взр} = \sum_i \Delta U_{пг_i}^{T_{взр}} n_{пг_i}, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (2.41)$$

Жарылыс қысымын формула бойынша есептеуге болады:

$$P_{взр} = \frac{P_0 n_{пг} T_{взр}}{n_{гс} T_0}, \text{ кПа}, \quad (2.42)$$

мұнда $P_{\text{взр}}$ – жарылыс кезінде жану өнімдердің қысымы, кПа;

P_0 – жаңғыш қоспаның бастапқы қысымы, кПа;

$T_{\text{взр}}$ – жаңғыш қоспаның жарылыс температурасы, К;

T_0 – бастапқы қоспаның бастапқы температурасы, К;

$n_{\text{пр}}$ – жану өнімдердің моль саны, моль·моль⁻¹;

$n_{\text{гс}}$ – бастапқы қоспаның моль саны, моль·моль⁻¹.

§ 3.1. Жеке заттың жарылыс қысымы мен минималды температурасын есептеу

Жарылыстың максималды температурасы мен қысымын жүйенің ішкі энергия мәндерін қолданып, жану реакция теңдеуі бойынша есептейді. Сонымен қатар, келесі жағдайларды есепке алады:

- қоспаның тұрақты көлем шартында происходит адиабатическое сгорание смеси при постоянном объеме;

- жану жаңғыш заттың және ауаның стехиометриялық ара қатынасында ($\alpha = 1$) жүреді;

- заттың жануы жану өнімдердің температуралық диссоциациясысыз жүреді.

Жарылыстың қысымы мен

максималды температурасын есептеу әдістемесі

1. Жану реакция теңдеуін құрастыру.
2. Жану өнімдердің салыстырмалы теориялық моль санын $n_{\text{пр}}^{\circ}$ есептеу.
3. Бастапқы жаңғыш қоспаның теориялық моль санын есептеу:

$$n_{\text{ге}} = 1 + \beta \cdot 4,76, \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (2.43)$$

4. Гесс заңы немесе анықтама мәліметтері бойынша заттың төменгі тұрақты жану жылулығын анықтау (2.14).
5. (2.40) формула бойынша қоспаның жарылу энергиясын есептеу.
6. Жарылыс өнімдердің орташа энергиясын анықтау:

$$Q_{\text{всп}} = \frac{Q_{\text{взр}}}{n_{\text{пр}}^{\circ}}, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (2.44)$$

7. Азоттың молярлық ішкі энергиясын (қосымшаның 3 кестесі) есепке алып, бірінші жақындатудағы T_1 жарылыстың температурасын анықтау.

8. T_1 температурада жану өнімдердің ішкі энергия мәндерін қолданып (қосымшаның 3 кестесі), формула бойынша жарылыс өнімдердің энергиясын есептеу:

$$Q_{v_{\text{пг}}}^{T_1} = \sum_i U_{\text{пг}i}^{T_1} \cdot n_{\text{пг}i}, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (2.45)$$

9. Екінші жақындатуда жарылыс температурасын анықтау: $T_2 < T_1$, егер $Q_{v_{\text{пг}}}^{T_1} > Q_{\text{взр}}$; немесе $T_2 > T_1$, егер $Q_{v_{\text{пг}}}^{T_1} < Q_{\text{взр}}$.

10. Жану өнімдердің ішкі энергиясын есепке алып, T_2 температурасында жарылыс өнімдердің энергиясын есептеу:

$$Q_{v_{\text{пг}}}^{T_2} = \sum_i U_{\text{пг}i}^{T_2} \cdot n_{\text{пг}i}, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \quad (2.46)$$

11. Сызба интерполяциялау әдісімен жарылыстың температурасын есептеу:

$$T_{\text{взр}} = T_1 + \frac{(T_2 - T_1) \cdot (Q_{\text{взр}} - Q_{v_{\text{пг}}}^{T_1})}{(Q_{v_{\text{пг}}}^{T_2} - Q_{v_{\text{пг}}}^{T_1})}, \text{ К}. \quad (2.47)$$

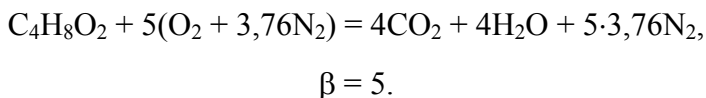
12. (2.42) формула бойынша жарылыстың максималды қысымын есептеу.

Есеп шығару мысалы

Этилацетаттың $C_4H_8O_2$ ($\Delta H_f^\circ = -442,9$ кДж·моль⁻¹) стехиометриялық бу-ауа қоспаның жарылыс қысымын және максималды температурасын анықтау, егер бу-ауа қоспаның бастапқы температурасы – 25 °С, ал қысымы – 110 кПа.

Шығару

1. Этилацетаттың жану реакциясының теңдеуін құрастырып, стехиометриялық коэффициент β анықтаймыз:



2. Жану өнімдердің салыстырмалы теориялық моль санын есептейміз:

$$n_{\text{пр}}^\circ = 4 + 4 + 5 \cdot 3,76 = 26,8 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. (2.43) формула бойынша бастапқы қоспаның теориялық моль санын есептейміз:

$$n_{\text{тс}}^0 = 1 + 5 \cdot 4,76 = 24,8 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

4. Төменгі молярлық жану жылулығын есептейміз:

$$Q_{\text{н}} = |4 \cdot (-393,5) + 4 \cdot (-241,8) - (-442,9)| = 2100 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

5. Жаңғыш қоспаның жарылыс энергиясын есептейміз:

$$\Delta n = 26,8 - 24,8 = 2 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1},$$

$$Q_{\text{взр}} = 2100 + 2 \cdot 8,314 \cdot 10^{-3} \cdot 298 = 2105 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

6. Жарылыс өнімдердің орташа энергиясын есептейміз, (2.44):

$$Q_{\text{вср}} = \frac{2105}{26,8} = 78,52 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

7. Азоттың молярлық ішкі энергиясын (қосымшаның 3 кестесі) негізге алып, бірінші жақындатуда $T_1 = 3000 \text{ К}$ жарылыс температурасын анықтаймыз.

8. T_1 температурада жану өнімдердің ішкі энергиясын анықтаймыз және (2.45) формула бойынша жарылыс өнімдердің энергиясын есептейміз:

$$U_{\text{CO}_2}^{T_1} = 137,7 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$U_{\text{N}_2}^{T_1} = 76,9 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$U_{\text{H}_2\text{O}}^{T_1} = 113,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$Q_{\text{впг}}^{T_1} = 137,7 \cdot 4 + 113,2 \cdot 4 + 76,9 \cdot 5 \cdot 3,76 = 24497 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}$$

1.

9. Екінші жақындатуда жарылыс температурасын анықтаймыз. $Q_{\text{впг}}^{T_1} > Q_{\text{взр}}$ болғандықтан, екінші жақындатудағы температураны бірінші мәнінен төмен аламыз: $T_2 = 2600 \text{ К}$.

10. T_2 температурада жарылыс өнімдерінің ішкі энергиясын (2.46) формула бойынша есептейміз:

$$U_{\text{CO}_2}^{T_2} = 116,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad U_{\text{N}_2}^{T_1} = 65,4 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$U_{\text{H}_2\text{O}}^{T_2} = 93,95 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$Q_{\text{v,пр}} T_2 = 116,2 \cdot 4 + 93,95 \cdot 4 + 65,4 \cdot 5 \cdot 3,76 = 2071 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

11. [2.47] формула бойынша сызба интерполяциялау әдісімен жарылыс температурасын есептейміз:

$$T_{\text{взр}} = 3000 + \frac{(2600 - 3000)(2104,5 - 2449,7)}{(2071 - 2449,7)} = 2635 \text{ К.}$$

12. (2.42) формула бойынша берілген жағдайда этилацетаттың стехиометриялық бу-ауа қоспасы үшін жарылыстың максималды қысымын есептейміз:

$$P_{\text{max}} = \frac{110 \cdot 26,8 \cdot 2635}{24,8 \cdot 298} = 955 \text{ кПа.}$$

Қорытынды: жарылыс кезінде берілген жағдайда этилацетаттың стехиометриялық бу-ауа қоспасы үшін жарылыс температурасы 2635 К, ал жарылыс өнімдер қысымы – 955 кПа.

§ 3.2. Жеке заттың ауаның артық мөлшерінде жарылыс температурасын есептеу

Технологиялық үрдістің апаттық бұзылу кезінде (бөлмеде жаңғыш газдардың шығуы немесе жаңғыш сұйықтың төгілуі және булануы) өндірістік бөлмеде жаңғыш заттың концентрациясы артады, ал ауаның мөлшері төмендейді. Жаңғыш заттың концентрациясы шектік мәніне жеткенде (төменгі концентрациялық шегі φ_H) кинетикалық аумақта жанатын орта пайда болады, яғни газ-ауа немесе бу-ауа қоспа жарылуы мүмкін. Кинетикалық жану үшін қоспа құрамында оттегінің және жаңғыш заттың шектік мөлшерін көрсететін артық ауа коэффициентінің α_{\min} және α_{\max} шектік мәндері бар.

Апаттық төгілу кезінде жаңғыш заттың бөлмеге түсі нәтижесінде пайда болатын және жаңғыш заттың төменгі жарылыс қауіпті мөлшері φ_H бар қоспа құрамында оттегінің артықшылығы бар. Бұл жағдайда артық ауа коэффициентін теңдеу бойынша анықтауға болады:

$$\alpha_{\max} = \frac{100 - \varphi_H}{\varphi_H \cdot v_B^0} \quad \text{немесе} \quad \alpha_{\max} = \frac{100 - \varphi_H}{\varphi_H \cdot n_B^0}, \quad (2.45)$$

мұнда φ_{H} – жаңғыш заттың ауамен қоспасы үшін жалын таралудың төменгі концентрациялық шегі, %;

$v_{\text{B}}^{\circ}, n_{\text{B}}^{\circ}$ – ауаның сәйкес салыстырмалы теориялық көлемі немесе моль саны.

Онда ауаның нақты моль саны:

$$n_{\text{B}} = \alpha \cdot n_{\text{B}}^{\circ} = \frac{100 - \varphi_{\text{H}}}{\varphi_{\text{H}}}. \quad (2.46)$$

Жану өнімдер құрамында ауысатын артық ауа мөлшерін формула бойынша анықтауға болады:

$$\Delta n_{\text{B}} = \alpha \cdot n_{\text{B}}^{\circ} - n_{\text{B}}^{\circ} = \frac{100 - \varphi_{\text{H}}}{\varphi_{\text{H}}} - n_{\text{B}}^{\circ}. \quad (2.47)$$

Жану өнімдердің нақты моль саны мен бастапқы қоспаның нақты моль саны үшін (стехиометриялық қоспа үшін сияқты):

$$\begin{aligned} \Delta n &= n_{\text{ПГ}} - n_{\text{ГС}} = n_{\text{ПГ}}^{\circ} + \Delta n_{\text{B}} - (1 + \alpha n_{\text{B}}^{\circ}) = \\ &= n_{\text{ПГ}}^{\circ} - (n_{\text{B}}^{\circ} + 1) \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}. \end{aligned} \quad (2.48)$$

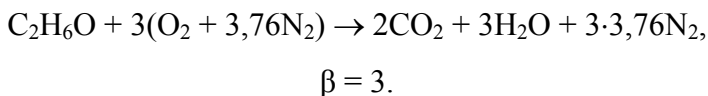
(2.47) формула бойынша бастапқы жаңғыш қоспа және жану өнімдері құрамында артық ауа бар деп есепке алса, алдында келтірілген әдісін қолданып, артық ауа кезінде жеке заттың жарылыс температурасы мен қысымын есептеуге болады. Ол үшін алдымен анықтама [7] бойынша немесе есептеу арқылы жаңғыш заттың жалын таралу төменгі концентрациялық шегін ϕ_n анықтау керек.

Есеп шығару мысалы

Спирт зауыты цехында технологиялық құбырлардың үзілу және этанолдың булануы нәтижесінде бу-ауа қоспаның жану кезінде пайда болған жарылыстың температурасын есептеңіз. Жарылыс бастапқы тұрақты жағдайларда, этанол буларының концентрациясы жалын таралу төменгі концентрациялық шегіне жеткенде өтті. Жану кезінде тек толық жану өнімдері түзілді, олардың диссоциациясы болған жоқ.

Шығару

1. Этанолдың ауада жану реакция теңдеуін құрастырамыз:



2. Ауаның салыстырмалы теориялық моль санын анықтаймыз:

$$n_{\text{B}}^0 = 4,76 \cdot \beta = 4,76 \cdot 3 = 14,3 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Жану өнімдердің салыстырмалы теориялық моль санын анықтаймыз:

$$n_{\text{пт}}^0 = 2 + 3 + 3,76 \cdot 3 = 16,3 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

4. Бастапқы қоспаның моль саны мен жану өнімдердің моль саны арасындағы айырмашылықты анықтаймыз:

$$\Delta n = 16,3 - (14,3 + 1) = 1 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

5. Анықтама [7] бойынша этанол жалының төменгі концентрациялық таралу шегін анықтаймыз: $\varphi_n = 3,6 \%$.

6. (2.45) формула бойынша ауамен қоспадағы жарылыс қауіпі бар жаңғыш заттың ең аз мөлшеріне сәйкес келетін артық ауа коэффициентін φ_n есептейміз:

$$\alpha = \frac{100 - 3,6}{14,28 \cdot 3,6} = 1,9.$$

7. Артық ауа мөлшерін есепке алып, бастапқы жаңғыш қоспаның моль санын анықтаймыз:

$$n_{ГС} = 1 + 1,9 \cdot 14,3 = 28,2 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

8. (1.17) формула бойынша артық ауа коэффициентін есепке алып, жану өнімдердің нақты моль санын анықтаймыз:

$$n_{IIГ} = 16,3 + (1,9 - 1) \cdot 14,3 = 29,2 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

9. (2.40) формула бойынша этанолдың бу-ауа қоспасының жарылыс энергиясын есептейміз. Анықтама [18] бойынша этанолдың тұрақты түзілу жылулығын анықтаймыз: $Q_n = 1408 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

$$Q_{\text{взр}} = 1408 + 1 \cdot 8,314 \cdot 10^{-3} \cdot 298 = 1410,5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

10. [2.44] формула бойынша жарылыс өнімдердің орташа энергиясын есептейміз:

$$Q_{\text{в ср}} = \frac{1410,5}{29,2} = 48,3, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

11. Азоттың молярлық ішкі энергиясын негізге алып (қосымшаның 3 кестесінен), бірінші жақындатуда жарылыстың температурасын анықтаймыз: $T_1 = 2000 \text{ К}$.

12. T_1 температурада жану өнімдердің ішкі энергиясын анықтаймыз және артық ауа коэффициентін ескеріп, (2.45) формула бойынша жарылыс өнімдердің энергиясын есептейміз:

$$U_{\text{CO}_2}^{T_1} = 84,5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$U_{\text{N}_2}^{T_1} = 48,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$U_{\text{H}_2\text{O}}^{T_1} = 66,8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad U_{\text{B}}^{T_1} = 49,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{vIII}}^{T_1} &= 2 \cdot 84,5 + 3 \cdot 66,8 + 3 \cdot 3,76 \cdot 48,6 + (1,9 - 1) \cdot 14,3 \cdot 49,2 = \\ &= 1550,9 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \end{aligned}$$

13. Екінші жақындатуда T_2 жарылыс температурасын анықтаймыз. $Q_{\text{vIII}}^{T_1} > Q_{\text{взр}}$ болғандықтан, екінші жақындатудағы температураны бірінші мәнінен төмен етіп аламыз: $T_2 = 1800 \text{ К}$.

14. (2.46) формула бойынша T_2 температурада жарылыс өнімдерінің ішкі энергиясын есептейміз:

$$U_{\text{CO}_2}^{T_2} = 74,1 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$U_{\text{N}_2}^{T_2} = 43,0 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$U_{\text{H}_2\text{O}}^{T_2} = 58,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$U_{\text{B}}^{T_2} = 43,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$Q_{\text{vнғ}}^{T2} = 2 \cdot 74,1 + 3 \cdot 58,2 + 3 \cdot 3,76 \cdot 43,0 + (1,9 - 1) \cdot 14,3 \cdot 43,6 = \\ = 1368,1 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

15. (2.47) формула бойынша жарылыс температурасын есептейміз:

$$T_{\text{взр}} = 2000 + \frac{(1800 - 2000)(1410,5 - 1550,9)}{1368,1 - 1550,9} = 1846 \text{ К}.$$

16. (2.42) формула бойынша жарылыстың қысымын есептейміз:

$$P_{\text{взр}} = \frac{101,3 \cdot 29,2 \cdot 1846}{28,2 \cdot 298} = 649,8 \text{ кПа}.$$

Қорытынды: спирт зауытында этанолдың апаттық төгілу нәтижесінде этанолдың бу-ауа қоспасының жарылу кезіндегі температурасы 1846 К, ал жарылыс қысымы – 649,8 кПа.

ӨЗІНДІК БАҚЫЛАУҒА АРНАЛҒАН ТАПСЫРМАЛАР

1. Кестеде келтірілген заттар үшін анықтау:

а) заттың тұрақты түзілу жылулығын, төменгі және жоғарғы молярлық жану жылулығын;

б) жоғарғы массалық және көлемдік жану жылулығын;

в) жану өнімдердің энтальпиясын қолданып, адиабатикалық жану температурасын;

г) жану өнімдердің жылу сыйымдылығын қолданып, адиабатикалық жану температурасын.

2. Кестеде құрамы берілген газ қоспасы үшін анықтау:

а) төменгі көлемдік жану жылулығын;

б) жану өнімдердің энтальпиясын қолданып, адиабатикалық жану температурасын;

в) жану өнімдердің жылу сыйымдылығын қолданып, адиабатикалық жану температурасын.

2 тарау. Жану үрдісінің энергетикалық теңгерімі

№	Зат	α	№	Зат	α
1.	метан CH_4	1,8	21.	дихлорэтан $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$	1,1
2.	метанол CH_4O	1,2	22.	толуол C_7H_8	1,3
3.	циклопентан C_5H_{10}	1,5	23.	диметилкетон $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	1,4
4.	бензол C_6H_6	1,6	24.	фенол $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$	1,2
5.	пропилен C_3H_6	1,2	25.	этилацетат $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	1,3
6.	гептанол $\text{C}_7\text{H}_{16}\text{O}$	1,3	26.	циклогексанол $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$	1,8
7.	пентан C_5H_{12}	1,5	27.	глицерин $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	1,3
8.	көміртегі сульфиді CS_2	1,7	28.	бутанол $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	1,9
9.	нитробензол $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	1,1	29.	бензил спирті $\text{C}_7\text{H}_8\text{O}$	2,0
10.	октан C_8H_{18}	1,6	30.	пропанол $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	1,2
11.	анилин $\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	1,3	31.	нитротолуол $\text{C}_7\text{H}_7\text{NO}_2$	1,7
12.	диэтил эфирі $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	2,0	32.	фталъ қышқылы $\text{C}_8\text{H}_4\text{O}_3$	1,5
13.	хлоргексан $\text{C}_6\text{H}_{13}\text{Cl}$	2,1	33.	этанол $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	1,4
14.	диметиламин $\text{C}_2\text{H}_7\text{N}$	1,8	34.	амилацетат $\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}_2$	2,2
15.	уротропин $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$	2,2	35.	хлорбензол $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	2,6
16.	ацетилен C_2H_2	2,5	36.	хлорбутан $\text{C}_4\text{H}_9\text{Cl}$	1,9
17.	диэтилкетон $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}$	1,9	37.	бутан C_4H_{10}	2,4
18.	диэтил эфирі $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	2,7	38.	пропан C_3H_8	1,8
19.	динитрофенол $\text{C}_6\text{H}_4\text{O}_5\text{N}_2$	1,8	39.	гексан C_6H_{14}	2,7
20.	диметилфосфат $(\text{CH}_3)_2\text{HPO}_4$	1,4	40.	дихлордиэтилсульфид $(\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl})_2\text{S}$	1,4

2 тарау. Жану үрдісінің энергетикалық теңгерімі

№	Газ қоспасы	α	Газдардың мөлшері, көл. %									
			H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₈	CO ₂
<i>Газдар</i>												
21	сулы	1,1	45	35	14	-	-	-	-	-	-	6
22	сулы	1,2	50	40	1	-	-	-	-	-	4	5
23	жартылай сулы	1,3	10	22	3	-	-	-	-	-	9	56
24	оттекті сулы	1,5	33	54	1	-	-	-	-	-	10	2
25	домен	1,4	2	28	1	-	-	-	-	-	19	50
26	домен	1,7	3	29	0,5	-	-	-	-	-	16,5	51
27	генераторлы	1,6	21	39	40	-	-	-	-	-	-	-
28	кокс	2,0	57	8	23	3	3	-	-	-	3	3
29	кокс	1,8	53	5	30	2	4	-	-	-	2	4
30	тұрмыстық	2,1	35	20	30	-	-	-	-	-	8	7
31	табиғи	2,2	-	-	65	15	-	-	13	-	-	7
32	жерасты газификациялау	1,9	13	15	2	-	-	-	-	-	10	60
<i>Сұйықтар пиролизінің газ тәрізді өнімдері</i>												
33	Газды бензин	1,1	16	-	28	8	24	-	4	6	14	-
34	лигроин	1,2	15	-	25	9	26	7	3	-	10	3
35	керосин	1,3	18	-	32	5	26	-	5	-	3	6
36	газды конденсат	1,4	25	-	24	7	16	-	8	-	7	10
37	сланц шайыры	1,5	21	-	33	8	17	8	-	1	1	10
38	полимерлер крекингі	1,6	18	-	31	8	23	-	3	4	3	6
39	шикі мұнай	1,7	17	-	24	9	26	3	4	6	4	6
40	тазартылған мұнай	1,8	14	-	31	20	-	-	15	20	-	-

3. Кесте келтірілген заттар үшін анықтау:

а) судың берілген массасын қыздыру үшін қажетті жандырылатын жаңғыш заттың массасын анықтаңыз (судың қызу интервалы және қыздыру кезінде

шығындалатын жылу үлесі кестеде келтірілген; судың жылу сыйымдылығы $4,18 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$);

б) жаңғыш заттың толық жануы кезінде бөлінген жылудың 100 % судың берілген мөлшерінің булануына жұмсалған шартында жаңғыш заттың массасын анықтаңыз (судың булану жылулығы $2260 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$);

в) аумағы 150 м^2 бөлменің өрт жүктемесін анықтаңыз, егер әрбірінің массалары 20 кг болатын үш түрлі жаңғыш материалдар (оқытушы береді);

г) жану өнімдердің энтальпиясын қолданып, жаңғыш заттың адиабатикалық температурасын анықтаңыз, егер жану үрдісі жылу шығынсыз, артық ауа коэффициенті белгілі болған жағдайда жүрсе;

д) жану өнімдердің жылу сыйымдылығын қолданып, заттың жану температурасын анықтаңыз, егер жану үрдісі артық ауа коэффициенті (α) белгілі және және жылу шығыны болған жағдайда жүрсе.

2 тарау. Жану үрдісінің энергетикалық теңгерімі

№	Зат	Зат құрамы, % мас.						Жылу шығыны, % Q _н	α	m H ₂ O, кг	Қыздыру шегі, °C
		C	H	O	S (N)	W	A				
1.	мұнай	84	14	–	1	1	–	10	1,8	30	5 – 80
2.	– // –	85	13	1	–	1	–	8	1,7	40	10 – 100
3.	керосин	85	14	1	–	–	–	7	1,6	110	20 – 80
4.	бензин	83	12	3	2	–	–	6	1,5	90	0 – 25
5.	– // –	83	15	1		1		9	1,9	20	10 – 70
6.	диз. жанар-май	86	12	1	(1)	–	–	5	1,4	30	15 – 60
7.	мазут	83	11	1	(4)	1	–	24	1,3	50	15 – 90
8.	ағаш	45	6	41	(2)	4	2	13	1,5	40	5 – 70
9.	– // –	42	6	38	(4)	7	3	5	1,3	30	10 – 100
10.	– // –	45	7	40	–	7	1	4	1,2	60	20 – 100
11.	– // –	46	6	41	–	5	2	5	1	70	15 – 95
12.	торф	46	5	40	(4)	4	1	7	1,6	30	5 – 100
13.	– // –	54	5	30	1	7	3	5	1,2	40	10 – 85
14.	– // –	56	4	36	1	1	2	16	1,3	50	5 – 95
15.	– // –	57	6	34	1	1	1	4	1,7	30	10 – 80
16.	көмір	78	7	10	2	1	2	10	1,4	40	5 – 100
17.	– // –	80	5	10	3	1	1	7	1,8	50	10 – 95
18.	– // –	77	5	11	3	1	3	10	1,5	40	0 – 90
19.	– // –	83	5	8	1	1	2	5	1,4	30	5 – 95
20.	– // –	86	5	6	1	2	–	6	1,3	50	0 – 100
21.	кокс	93	4	2	1	–	–	17	1,2	30	10 – 95
22.	– // –	91	6	2	1	–	–	4	1,1	15	5 – 95
23.	– // –	96	1	–	1	–	2	25	2,0	60	5 – 95
24.	– // –	98	–	–	1	–	1	10	1,9	40	10 – 95
25.	– // –	92	3	1	–	–	4	9	1,6	50	5 – 95

2 тарау. Жану үрдісінің энергетикалық теңгерімі

26.	-// -	85	13	1	-	-	1	7	1,5	40	8 – 100
27.	-// -	84	14	1	-	-	1	10	1,4	50	5 – 100
28.	пластик	44	6	49	-	-	1	10	1,3	40	10 – 90
29.	-// -	45	5	49	-	-	1	10	1,2	30	10–100
30.	-// -	64	6	30	-	-	-	10	1,1	20	5 – 95
31.	қатты қағаз	50	20	15	-	5	10	8	1,8	100	-20– 10
32.	мақта	46	25	15	(6)	8	-	9	1,7	5	10 – 40
33.	каучук	85	13	1	1	-	-	7	1,5	10	10 – 70
34.	-// -	78	15	2	5	-			1,4	7	25 – 45
35.	-// -	81	16	1	1	-	1		1,1	15	30 – 85

4. Кестеде келтірілген заттар үшін:

а) тұрақты жағдайда жаңғыш заттың берілген массасының толық жануы кезінде бөлінетін жылу мөлшерін анықтаңыз; судың қандай массасы қайнау температурасына дейін қызу мүмкін (судың бастапқы температурасы $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, судың жылу сыйымдылығы $c_p = 4,18\text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$);

б) өндірістік бөлмеде жаңғыш сұйықтың апаттық төгілу нәтижесінде будың диффузионды жану температурасын анықтаңыз, егер жану өнімдердің құрамында оттегінің соңғы мөлшері кесте келтірілсе.

2 тарау. Жану үрдісінің энергетикалық теңгерімі

№	Зат	Жалпы формула	Су мас- сасы, кг	Жану өнімдегі оттегі мөлшері, %
1.	акрил қышқылы	$C_3H_4O_2$	7	13
2.	амилацетат	$C_7H_{14}O_2$	3	16
3.	амил спирті	$C_5H_{12}O$	5	11,5
4.	анилин	C_6H_7N	10	15
5.	ацетон	C_3H_6O	12	18
6.	ацетанилид	C_8H_9ON	25	15
7.	ацетальдегид	C_2H_4O	16	14
8.	бензол	C_6H_6	4	13
9.	бутилацетат	$C_6H_{12}O_2$	8	12
10.	бутил спирті	$C_4H_{10}O$	15	14
11.	тиодигликоль	$C_4H_{10}O_2S$	54	15
12.	циклопентан	C_5H_{10}	26	18
13.	метанол	CH_4O	47	12
14.	ксилол	C_8H_{10}	45	17
15.	бензин Б-70	$C_{7,267}H_{14,796}$	50	14
16.	бензин А-72 "З"	$C_{6,991}H_{13,108}$	40	16
17.	бензин А-93 "Л"	$C_{7,024}H_{13,706}$	30	19
18.	бензин А-93 "З"	$C_{6,911}H_{12,168}$	20	17
19.	дизель жанармайы "З"	$C_{12,343}H_{23,889}$	10	15
20.	дизель жанармайы "Л"	$C_{14,511}H_{29,120}$	5	16
21.	уайт-спирит	$C_{10,5}H_{21,0}$	55	18
22.	керосин ГО – 20	$C_{13,595}H_{28,860}$	15	19
23.	керосин ГО – 22	$C_{10,914}H_{21,832}$	25	13
24.	керосин ГО – 25	$C_{11,054}H_{21,752}$	35	14
25.	трансформатор майы	$C_{21,74}H_{42,28}S_{0,04}$	65	16
26.	май АМТ-300	$C_{22,25}H_{33,48}S_{0,34}N_{0,07}$	75	17
27.	май АМТ-300Т	$C_{19,04}H_{24,58}S_{0,196}N_{0,04}$	85	15
28.	еріткіш Р-3	$C_{5,452}H_{7,606}O_{0,535}$	95	19
29.	еріткіш Р-4	$C_{6,231}H_{7,798}O_{0,223}$	150	15
30.	еріткіш Р-5	$C_{5,309}H_{8,655}O_{0,897}$	200	14
31.	еріткіш Р-12	$C_{6,837}H_{9,217}O_{0,515}$	60	16
32.	еріткіш М	$C_{2,761}H_{7,147}O_{1,187}$	70	19
33.	еріткіш РМЛ	$C_{2,645}H_{6,810}O_{1,038}$	80	16
34.	еріткіш РМЛ-218	$C_{4,791}H_{8,318}O_{0,974}$	90	14
35.	еріткіш РМЛ-315	$C_{5,962}H_{9,779}O_{0,845}$	100	17

5. Кесте келтірілген заттар үшін анықтау:

а) тұрақты жағдайда бу-ауа жаңғыш қоспаның максималды жарылыс температурасын және қысымын анықтаңыз;

б) апаттық төгілу кезінде жаңғыш сұйықтың булануы нәтижесінде пайда болған жаңғыш қоспаның жарылыс температурасын және қысымын анықтаңыз, егер будың концентрациясы жалын таралу төменгі концентрациялық шегіне φ_H жетсе (күрделі заттардың φ_H мәндерін қосымшаның кестесінде қара).

№	Зат	Формула	№	Зат	Формула
1.	бутанон	C_4H_8O	21.	этан	C_2H_6
2.	этилацетат	$C_4H_8O_2$	22.	диметилфосфат	$(CH_3)_2HPO_4$
3.	аллил спирті	C_3H_6O	23.	нитротолуол	$C_7H_7O_2N$
4.	фенилэтил эфиірі	$C_6H_{10}O$	24.	фталъ қышқылы	$C_8H_4O_3$
5.	пентан қышқылы	$C_5H_{10}O_2$	25.	бензил спирті	C_7H_8O
6.	диоксан	$C_4H_8O_2$	26.	этилацетат	$C_4H_8O_2$
7.	гексадиен	C_6H_{10}	27.	циклогексанол	$C_6H_{12}O$
8.	этилтолуол	C_9H_{12}	28.	нитротолуол	$C_7H_7NO_2$
9.	метилбутират	$C_5H_{10}O_2$	29.	диэтилсульфид	$(C_2H_5)_2S$
10.	бутаналь	C_4H_8O	30.	о-ксилол	C_8H_{10}
11.	нитротолуол	$C_7H_7NO_2$	31.	бутан қышқылы	$C_4H_8O_2$
12.	гексилметилкетон	$C_8H_{16}O$	32.	диизопропилкетон	$C_7H_{14}O$
13.	толуол	C_7H_8	33.	бензилбензоат	$C_{14}H_{12}O_2$
14.	бутанол	$C_4H_{10}O$	34.	этилбензол	C_8H_{10}
15.	амилметилкетон	$C_7H_{14}O$	35.	амилциклогексан	$C_{11}H_{22}$
16.	уайт-спирит	$C_{10,5}H_{21,0}$	36.	бензин Б-70	$C_{7,267}H_{14,796}$
17.	керосин КО – 20	$C_{13,595}H_{28,860}$	37.	бензин А-72(з)	$C_{6,991}H_{13,108}$
18.	керосин КО – 22	$C_{10,914}H_{21,832}$	38.	бензин А-93 (л)	$C_{7,024}H_{13,706}$
19.	керосин КО – 25	$C_{11,054}H_{21,752}$	39.	бензин А-93 (з)	$C_{6,911}H_{12,168}$
20.	дизель жанармайы	$C_{12,343}H_{23,889}$	40.	дизель жанармайы	$C_{14,511}H_{29,120}$

ҚОСЫМШАЛАР

1 кесте — Тұрақты қысымда жану өнімдердің молярлық энтальпиясы

Температура, К	Энтальпия, кДж-моль ⁻¹									
	Воздух	CO ₂	H ₂ O	N ₂	HF	HCl	HBr	SO ₂		
298,15	8,66	9,35	9,91	8,67	8,60	35,99	76,50	44,61		
400	11,64	13,36	13,36	11,64	11,56	38,96	79,50	78,86		
600	17,62	22,25	20,41	17,56	17,40	44,83	85,40	88,15		
800	23,86	32,14	27,93	23,71	23,28	50,82	91,50	98,33		
1000	30,36	42,72	35,94	30,13	29,25	57,04	97,80	109,04		
1200	37,09	53,77	44,48	36,78	35,36	63,48	104,40	120,08		
1400	44,00	65,19	53,51	43,61	41,63	70,12	111,20	131,35		
1600	51,05	76,87	62,97	50,58	48,08	76,94	118,10	142,77		
1800	58,20	88,70	72,82	57,65	54,70	83,90	125,20	154,31		
2000	65,44	100,71	83,02	64,81	61,45	90,99	132,40	165,95		
2200	72,76	112,82	93,41	71,97	68,27	98,08	139,60	177,55		
2400	80,14	125,04	104,14	79,26	75,26	105,34	147,00	189,27		
2600	86,58	137,32	115,08	86,57	82,32	112,67	154,40	201,21		
2800	95,06	149,69	126,22	93,91	89,48	120,09	161,70	213,16		
3000	102,60	162,10	137,56	101,30	96,74	127,64	169,40	225,15		
3200	110,17	174,55	149,05	108,71	104,04	135,06	177,00	237,24		
3400	117,77	187,06	160,69	116,14	111,40	142,62	184,70	249,36		
3600	125,41	199,61	172,47	123,61	118,84	150,24	192,40	261,59		
3800	133,08	212,19	184,37	131,08	126,33	157,90	200,00	273,89		
4000	140,77	224,81	196,42	138,58	133,85	165,60	207,90	286,20		

2 кесте — Тұрақты қысымда жану өнімдердің көлемдік энтальпиясы

Температура, К	Энтальпия, кДж·м ⁻³									
	Воздух	CO ₂	H ₂ O	N ₂	HF	HCl	HBr	SO ₂		
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1220,44	3029,89	2858,55		
298,15	386,44	417,23	442,22	386,88	383,76	1605,98	3415,89	1990,63		
400	519,41	596,16	596,16	519,41	515,84	1738,51	3548,87	3518,97		
600	786,26	992,86	910,75	783,58	776,44	2000,45	3811,69	3933,51		
800	1064,70	1434,18	1246,32	1058,01	1038,82	2267,74	4083,89	4865,68		
1000	1354,75	1906,29	1603,75	1344,49	1305,22	2545,29	4366,8	5109,04		
1200	1655,07	2399,38	1984,83	1641,23	1577,8	2832,66	4660,87	5358,32		
1400	1963,41	2908,97	2387,77	1946,01	1857,65	3128,96	4963,41	5861,22		
1600	2278,00	3450,17	2809,91	2257,03	2145,47	3433,29	5273,99	6370,82		
1800	2597,06	3958,06	3249,44	2572,51	2440,88	3743,86	5589,92	6885,77		
2000	2920,13	4493,98	3704,60	2892,01	2742,08	4060,24	5911,65	7405,18		
2200	3246,77	5034,36	4168,23	3211,51	3046,43	4376,62	6231,15	7922,80		
2400	3576,08	5579,65	4647,03	3536,81	3358,32	4700,58	6559,57	8445,78		
2600	3863,45	6127,62	5135,21	3863,01	3673,36	5027,67	6892,01	8978,58		
2800	4241,86	6679,61	5632,31	4190,54	3992,86	5358,77	7217,32	9511,83		
3000	4578,31	7233,38	6138,33	4520,30	4316,82	5695,67	7563,14	10046,85		
3200	4916,11	7788,93	6651,05	4850,96	4642,57	6026,77	7901,83	10586,35		
3400	5255,24	8347,17	7170,46	5182,51	4970,99	6364,12	8244,09	11127,18		
3600	5596,16	8907,18	7696,12	5515,84	5302,99	6704,15	8587,24	11672,91		
3800	5938,42	9468,54	8227,13	5849,17	5637,22	7045,96	8933,51	12221,78		
4000	6281,57	10031,68	8764,84	6183,85	5972,78	7389,56	9281,12	12771,08		

3 кесте – Тұрақты көлемде жану өнімдердің молярлық ішкі энергиясы

Температура, К	Жану өнімдердің ішкі энергиясы, кДж·моль ⁻¹									
	Ауа	CO ₂	H ₂ O	N ₂	HF	HCl	HBr	SO ₂		
298,15	6,24	6,93	7,49	6,25	6,18	33,57	74,10	42,19		
400	8,39	10,11	10,11	8,39	8,31	35,71	76,20	75,61		
600	12,74	17,37	15,53	12,68	12,52	39,96	80,50	83,28		
800	17,36	25,64	21,43	17,21	16,78	44,32	85,00	91,83		
1000	22,23	34,59	27,81	22,00	21,12	48,91	89,70	100,92		
1200	27,34	44,02	34,73	27,03	25,61	53,73	94,70	110,33		
1400	32,62	53,81	42,13	32,23	30,25	58,74	99,80	119,98		
1600	38,05	63,87	49,97	37,58	35,08	63,94	105,10	129,77		
1800	43,57	74,07	58,19	43,02	40,07	69,27	110,60	139,69		
-000	49,18	84,46	66,77	48,55	45,19	74,74	116,20	149,70		
2200	54,88	94,94	75,53	54,09	50,39	80,20	121,70	159,68		
2400	60,63	105,54	84,64	59,75	55,75	85,84	127,50	169,77		
2600	65,45	116,19	93,95	65,44	61,19	91,54	133,30	180,09		
2800	72,30	126,94	103,46	71,15	66,72	97,33	138,90	190,41		
3000	78,22	137,72	113,18	76,92	72,36	103,26	145,10	200,78		
3200	84,16	148,55	123,04	82,70	78,03	109,05	151,00	211,24		
3400	90,14	159,43	133,06	88,51	83,77	114,99	157,10	221,74		
3600	96,15	170,36	143,21	94,35	89,58	120,98	163,10	232,34		
3800	102,20	181,31	153,49	100,20	95,44	127,02	169,30	243,02		
4000	108,26	192,31	163,91	106,07	101,34	133,09	175,40	253,70		

4 кесте — Жай заттар мен жану өнімдердің жылу

сыйымдылығы және түзілу жылулығы

Зат	Молярлық жылу сыйымдылығы c_p , Дж·моль ⁻¹ ·К ⁻¹	$c_p = a + bT$ теңдеу коэффициенттері, Дж·моль ⁻¹ ·К ⁻¹		$c_p = a + bT$ теңдеу коэффициенттері, Дж·м ⁻³ ·К ⁻¹		Түзілу жылулығы, ΔH_f° кДж·моль ⁻¹
		a	$b \cdot 10^3$	a	$b \cdot 10^3$	
ауа	29,16	28,62	4,08	1172,95	167,21	0,00
O ₂	29,36	31,46	3,39	1289,34	138,93	0,00
N ₂	29,10	27,87	4,27	1142,21	175,00	0,00
NO	29,83	29,58	3,85	1212,30	157,79	90,37
NO ₂	37,11	42,93	8,54	1759,43	350,00	33,89
CO	29,15	28,41	4,10	1164,34	168,03	-110,5
CO ₂	37,13	44,14	9,04	1809,02	370,49	-393,51
C (графит)	8,53	17,15	4,27	–	–	0
H ₂	28,83	27,28	3,26	1118,03	133,61	0
H ₂ O (газ)	33,56	30,00	10,71	1229,51	438,93	-241,84
H ₂ O (сұйық)	75,31	–	–	–	–	-285,84
HF	29,16	27,70	2,93	1135,25	120,08	-268,61
HCl	29,16	26,53	4,60	1087,30	188,52	-92,30
HBr	29,16	26,15	5,86	1071,72	240,16	-35,98
HJ	29,16	26,32	5,94	1078,69	243,44	25,94
SO ₂	39,87	42,55	12,55	1743,85	514,34	-296,90
SO ₃	50,63	57,32	26,86	2349,18	1100,82	-395,20
H ₂ S	33,93	29,37	15,40	1203,69	631,15	-20,15
NH ₃	36,65	29,80	26,48	1221,31	1085,25	-46,19

5 кесте — Кейбір жемшөптер шандарының өртжарылыс қауіпінің көрсеткіштері

№	Заг	Элементтік құрамы, мас. %					Өртжарылыс қауіпінің көрсеткіштері				$Q_{нз}$ кДж·кг ⁻¹
		C	H	O	N	S	$\phi_{нз}$, г·м ⁻³	P_{max} , кПа	$\frac{dP}{dt}$, с ⁻¹	$\phi_{мвск}$, об.%	
1	бидай егінi	43,6	7,0	44,7	3,4	1,25	55	483	6,2	11,8	17677
2	Жжем ашытқылары	35,6	6,2	44,58	7,9	5,8	36	650	9,2	11,0	19087
3	ұнтақталған жүгері	43,5	5,4	47,15	2,6	1,35	37	651	6,9	11,5	17543
4	ұнтақталған бидай	47	6,95	41,11	3,7	1,3	38	524	14,2	12,8	17322
5	ұнтақталған арпа	43,5	6,0	46,01	3,1	1,42	47	645	11,4	12,3	17372
6	ұнтақталған бұршак	45,8	6,5	42,8	3,6	1,3	52	620	19,3	11,8	18292
7	ұнтақталған сұлы	46,6	6,77	43,23	3,1	0,34	54	650	4,67	12,0	19206
8	ұнтақталған тары	44,1	6,82	46,02	2,5	0,58	36	—	—	—	18972
9	күнбағыс шрот	41,7	6,46	44,44	6,1	1,25	40	532	9,4	11,3	18368
10	соя шрот	43	6,57	42,32	6,9	1,2	49	673	12,5	16,0	18485
11	мақта шрот	45,1	6,41	41,72	5,3	1,56	42	547	4,07	12,5	21786

6 кесте — Газдар мен сұйықтардың минималды оталу энергиясы мен көлемдік жану жылулықтары

атауы	Зат	формула	Жану жылулығы, кДж·м ⁻³		Минималды оталу энергиясы, мДж	Гүзілу жылулығы, ΔН ^o _f , кДж·моль ⁻¹	t _{св} , °С
			жоғарғы, Q ^o _v	төменгі, Q ^o _n			
метан		CH ₄	39820	35880	0,28	-74,8	537
этан		C ₂ H ₆	70310	64360	0,24	-84,68	515
пропан		C ₃ H ₈	101210	93180	0,22	-103,8	470
н-бутан		C ₄ H ₁₀	133800	123570	0,25	-126,0	405
пентан		C ₅ H ₁₂	169270	150630	0,22	-146,4	286
н-гексан		C ₆ H ₁₄	187400	187400	0,25	-167,2	233
н-гептан		C ₇ H ₁₆	216880	200550	0,25	-187,7	223
циклогексан		C ₆ H ₁₂	—	—	0,22	-123,13	259
изооктан		C ₈ H ₁₈	—	—	1,35	—	411
сутегі		H ₂	12750	10790	0,017	0	510
сутегі сульфиді		H ₂ S	25350	23700	0,068	—	246
көміртегі сульфиді		CS ₂	—	—	0,009	88,7	102
көміртегі оксиді		CO	12640	12640	—	-110,5	605
этилен		C ₂ H ₄			0,12		435
этилцеллолоза		C ₄ H ₁₀ O ₂			0,15	-405,0	235
бензин АИ-92					0,3		435
уайт-спирит		C _{10,5} H ₂₁	—	—	0,33		250
н-кситол		C ₈ H ₁₀			84,5	-24,4	528

7 кесте – Сұйықтардың түзілу жылулығы

Зат	Формула	ΔH°_f , кДж·моль ⁻¹
акролеин	C_3H_4O	-58,5
аллил спирті	C_3H_6O	-131,8
амилбензол	$C_{11}H_{16}$	-34,4
амилметилкетон	$C_7H_{14}O$	-291
амил спирті	$C_5H_{12}O$	-302,5
амилциклогексан	$C_{11}H_{22}$	-233,8
анилин	C_6H_7N	109
ацетон	C_3H_6O	-217,57
ацетонитрил	C_2H_3N	-25,62
бензилбензоат	$C_{14}H_{12}O_2$	-372,84
бензил спирті	C_7H_8O	-220,86
бензол	C_6H_6	82,9
бутаналь	C_4H_8O	-205
бутандиол-2,3	$C_4H_{10}O_2$	-445,5
бутан қышқылы	$C_4H_8O_2$	-486,3
бутанон	C_4H_8O	-238,3
изобутилацетат	$C_6H_{12}O_2$	-535,5
бутилбензол	$C_{10}H_{14}$	-13,7
бутилметилкетон	$C_6H_{12}O$	-272
бутанол	$C_4H_{10}O$	-274,6
бутилфенол	$C_{10}H_{14}O$	-285,12
бутилформиат	$C_5H_{10}O_2$	-437,6
валеролактон	$C_5H_8O_2$	-421,14
гексадекан	$C_{16}H_{34}$	-373,3
гексадиен	C_6H_{10}	-94,1
валериан қышқылы	$C_5H_{10}O_2$	-490,4
валериан альдегиді	$C_5H_{10}O$	-227,8
гексан	C_6H_{14}	167,2
гексилметилкетон	$C_8H_{16}O$	-311,7
гексил спирті	$C_6H_{14}O$	-319,8
гептан	C_7H_{16}	-187,7
декан	$C_{10}H_{22}$	-249,6
диацетон спирті	$C_6H_{12}O_2$	-425

дибутил эфирі	$C_8H_{18}O$	-333,9
диизопропилкетон	$C_7H_{14}O$	-291
диоксан	$C_4H_8O_2$	-434,16
дипропил эфирі	$C_6H_{14}O$	-293,4
диэтиламин	$C_4H_{11}N$	-137,34
диэтиленгликоль	$C_4H_{10}O_3$	-642,84
диэтилизопропилметан	C_8H_{18}	-211,2
диэтилкетон	$C_5H_{10}O$	-252
диэтил эфирі	$C_4H_{10}O$	-252,2
додекан	$C_{12}H_{26}$	-290,9
изопропенилбензол	C_9H_{10}	-112,9
крезол	C_7H_8O	-158
ксилидин	$C_8H_{11}N$	-85,26
кумол	C_9H_{12}	-21,5
мезитилен	C_9H_{12}	-15,9
метиламинол	$C_6H_{14}O$	-344,2
метанол	CH_4O	-201,3
метилацетат	$C_3H_6O_2$	-409,1
метилбутират	$C_5H_{10}O_2$	-485
метилгексан-2	C_7H_{16}	-194,9
метилпентальдегид	$C_6H_{12}O$	-249,1
метилпропионат	$C_4H_8O_2$	-438,8
метилпропилкетон	$C_5H_{10}O$	-258,6
метилформиат	$C_2H_4O_2$	-349,8
метилциклогексан	C_7H_{14}	-154,7
метоксиэтилацетат	$C_5H_{10}O_3$	-573,6
құмырсқа қышқылы	CH_2O_2	-210,6
м-ксилол	C_8H_{10}	17,25
нонан	C_9H_{20}	-229
нонил спирті	$C_9H_{20}O$	-387
метилциклопентан	C_6H_{12}	-106,6
октан	C_8H_{18}	-208
октаналь	$C_8H_{16}O$	-643,96
октан қышқылы	$C_8H_{16}O_2$	-565,3
октил спирті	$C_8H_{18}O$	-357

октилциклогексан	$C_{14}H_{28}$	-295,6
пентан	C_5H_{12}	-146,4
пентанол-2	$C_5H_{12}O$	-314,13
пиридин	C_5H_5N	140,6
пропаналь	C_3H_6O	-221,7
пропиламин	C_3H_9N	-101,5
пропилбензол	C_9H_{12}	-7,9
пропилбутират	$C_7H_{14}O_2$	-556,8
пропиленгликоль	$C_3H_8O_2$	-499,9
пропанол	C_3H_8O	-257,7
пропилформиат	$C_4H_8O_2$	- 417
пропилциклогексан	C_9H_{18}	-193,3
пропилциклопентан	C_8H_{16}	-148
пропилэтилкетон	$C_6H_{12}O$	-272
пропион қышқылы	$C_3H_6O_2$	-466
пропион ангидридi	$C_6H_{10}O_3$	-289
стирол	C_8H_8	155,6
тетрагидрофуран	C_4H_8O	-214
тетраметилбензол	$C_{10}H_{14}$	-41,9
тетраметилгептан	$C_{11}H_{24}$	-276,2
тетраметилпентан	C_9H_{20}	-273,2
толуол	C_7H_8	50,17
тридекан	$C_{13}H_{28}$	-311,5
триметилбензол	C_9H_{12}	-15,9
триметилгексан	C_9H_{20}	-254
сірке қышқылы	$C_2H_4O_2$	-437,3
сірке ангидридi	$C_4H_6O_3$	-328
фенилэтил эфири	$C_8H_{10}O$	-84
хлорбензол	C_6H_5Cl	51,4
этилацетат	$C_4H_8O_2$	-442,9
этилбензол	C_8H_{10}	29,9
этиленгликоль	$C_2H_6O_2$	-453,8
этилтолуол	C_9H_{12}	-1,6
этилформиат	$C_3H_6O_2$	-371,2
этилциклогексан	C_8H_{16}	-171,7

АНЫҚТАМАЛАР

Жанудың пайда болуы – бұл это быстрый переход медленной окислительно-обновленной реакции к мгновенному преобразованию исходных веществ в продукты реакции за счет самоускорения. Это превращение носит взрывной характер и сопровождается вспышкой или звуковым эффектом.

Жоғарғы жану жылулығы – бұл жаңғыш қоспа мен жану өнімдері қалыпты жағдайда болатын, ал жану өнімдердің құрамындағы су конденсацияланған (сұйық) күйде болатын шартында жаңғыш заттың бірлік саны толық жану кезінде бөлінетін жылу мөлшері.

Жану – жылу және жарық сәулелену түрінде қарқынды энергияның бөлінуімен жүретін, негізінде жылдам тотығу-тотықсыздану реакциясы жататын күрделі физико-химиялық үрдіс.

Түтін – бұл газды дисперсионды ортада таралған $10^5 \div 10^8$ г мөлшердегі қатты және сұйық бөлшектерден (дисперсті фаза) тұратын дисперсты жүйе.

Жалын таралудың концентрациялық шектері (ЖТКШ) (төменгі немесе жоғарғы) – бұл жаңғыш бу

немесе газдың ауадағы ең төменгі немесе ең жоғарғы концентрациялары.

Артық ауа коэффициенті (α) – жануға нақты жұмсалатын ауа мөлшері және теориялық қажетті мөлшері арасындағы айырмашылығын көрсететін коэффициент.

Заттың төменгі жану жылулығы – бұл жаңғыш қоспа мен жану өнімдері қалыпты жағдайда болатын, ал жану өнімдері құрамындағы су газ күйінде болатын шартында жаңғыш заттың бірлік мөлшерінің толық жану кезінде бөлінетін жылу мөлшері.

Жалын – бұл жаңғыш қоспаның жануға дайындалумен және нақты жану үрдісімен байланысты барлық үрдістер жүретін газды көлем.

Жану өнімдері – бұл жану үрдісі кезінде жаңғыш заттың тотықтырғышпен әрекеттесу нәтижесінде түзілетін газ тәрізді, қатты және сұйық заттар.

Заттың тұрақты түзілу жылулығы ΔH_f^0 – бұл тұрақты жағдайда ($P = 101,3$ кПа, $T = 298$ К) жеке заттардан күрделі заттың 1 моль түзілу кезінде реакция жылулығы.

Стехиометриялық концентрация – жану реакция теңдеуіне сәйкес келетін жаңғыш заттың концентрациясы.

Жану температурасы – жану аумағында түзілу кезіндегі жану өнімдердің температурасы.

Реакцияның жылулық әсері – температура мен қысым немесе температура мен көлемнің тұрақтылығы шартында қайтымсыз химиялық реакция жүру кезінде жүйеде бөлінетін немесе жұмсалатын жылудың мөлшері.

Жану жылулығы – бұл толық жану өнімдердің пайда болуымен жүретін 1 моль жаңғыш заттың жануы кезінде бөлінетін жылулық мөлшері.

ӘРІПТІК КӨРСЕТКІШ

В
пирофорлы заттар, 166

Г
жану, 7, сл.
- энергетикалық теңгерім, 59
- материалдық теңгерім, 10
- реакция теңдеуі, 15

Д
түтін, 24
жарылыс қысымы, 107

И
артық ауа, 28

К
коэффициент
- стехиометриялық, 16
- артық ауа, 27
стехиометриялық
концентрация, 17

Н
өрт жүктемесі, 79

О
ауа көлемі, 29, 44, сл.
жану өнімдер көлемі, 30, 45

П
жалын, 10, сл.
жану өнімдері, 24, сл.

Р
реакция
- жану, 16, 20, 21
- жылулық әсері, 59

Т
температура
- жарылыс, 106
- жану, 80, сл.
жылулық
- жану, 62, сл., 69, 73
- түзілу, 63, 66

Э
энергия
- ішкі, 60
энтальпия, 60

Әдебиет

1. Процессы горения / Абдурагимов И.М., Андросов А.С., Исаева Л.К., Крылов Е.В. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1984. – 268 с.

2. Демидов П.Г., Шандыба В.А., Щеглов П.П. Горение и свойства горючих веществ. – М.: Химия, 1981. – 311 с.

3. Демидов П.Г., Саушев В.С. Горение и свойства горючих веществ. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1975. – 280с.

4. Исаев С.И. Курс химической термодинамики. – М.: Высшая школа, 1986. – 232 с.

5. Монахов В.Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. – М.: Химия, 1979. – 424 с.

6. Соколик А.С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. – М.: Изд-во АН СССР, 1960.

7. Справочник “Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения”/ Под редакцией А.Н. Баратова и А.Я. Корольченко, ч. I и II. – М.: Химия, 1990. – 650 с.

8. Баратов А.Н., Иванов Е.Н., Корольченко А.Я и др. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность. Справочник. – М.: Химия, 1987. – 272 с.

9. Справочник химика / Под ред. Б.П. Никольского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1963. Т.1. – 1002 с.

10. Розловский А.Н. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. – М.: Химия, 1980. – 376 с.

11. Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. – Харків: АПБУ, 2002. – 352 с.

12. Блинов В.И., Худяков Г.Н. Диффузионное горение жидкостей. – М.: РИСО АН СССР, 1961. – 210 с.

13. Таубкин С.И., Таубкин И.С. Пожаро- и взрывоопасность пылевидных материалов и технологических процессов их переработки. – М.: Химия, 1976. – 212 с.

14. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли. – М.: Химия, 1986. – 242 с.

15. Абдурагимов И.М., Говоров В.Ю., Макаров В.Е. Физико–химические основы развития и тушения пожара. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980. – 255 с.

16. Повзик Я.С., Ключ П.П., Матвейкин А.М., Пожарная тактика. – М.: Стройиздат, 1990. – 283 с.

17. Иванников В.П., Ключ П.П. Справочник руководителя тушения пожара. – М.: Стройиздат, 1987. – 288 с.

18. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров: Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1990. – 265 с.

19. Термогазодинамика пожаров в помещениях / Астапенко В.М., Кошмаров Ю.А., Молчадский И.С. и др. – М.: Стройиздат, 1988. – 295 с.

20. Романенко И.М., Кошмаров Ю.А, Башкирцев М.П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1977. – 415 с.

Учебное издание
на русском и казахском языках

Е.В. Тарахно, Д.Г. Трегубов, К.В. Жерноклев
Г.Ш. Хасанова, Д.Т. Казьяхметова

**ТЕОРИЯ РАЗВИТИЯ
И ПРЕКРАЩЕНИЯ ГОРЕНИЯ
ПРАКТИКУМ
ЧАСТЬ I**

**ЖАНУДЫҢ ДАМУЫ МЕН СӨНДІРУ
ТЕОРИЯСЫ ПРАКТИКУМ
I БӨЛІМ**

Подписано в печать 20.10.2017 г.
Формат 60x84/16 Усл.п.л. 21,6
Тираж 100 экз. Заказ № 756



Отпечатано в типографии «Мир печати»
ИП Устюгова Н.Ф.
020000, г.Кокшетау, ул.Капщевича, 230
Тел. 87162 32 62 26