

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА «БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ И ИНЖЕНЕРНАЯ ЭКОЛОГИЯ»

ХРИСТОФОРОВ Е.Н.
САКОВИЧ Н.Е.
АДЫЛИН И.П.

**РАСЧЕТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА**

**Учебное пособие для выполнения курсовой работы
по дисциплине «ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА»**



Брянская область
2023

УДК 544.45 (076)
ББК 24.54
Х 93

Христофоров, Е. Н. Расчет теплофизических и термодинамических показателей горения и взрыва: учебное пособие для выполнения курсовой работы по дисциплине «Теория горения и взрыва» / Е. Н. Христофоров, Н. Е. Сакович, И. П. Адылин. – Брянск: Изд-во ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, 2023. – 69 с.

Учебное пособие предназначено для студентов очной и заочной формы обучения направления 20.03.01 Техносферная безопасность, изучающих дисциплину «Теория горения и взрыва».

Рецензенты:

Начальник УМЦ по ГОЧС Брянской области Ю.А. Малашенко;

Директор инженерно-технологического института ФГБОУ ВО Брянский ГАУ д.т.н., профессор А.И. Купреенко.

Рекомендовано к изданию методической комиссией инженерно-технологического института Брянского ГАУ, протокол № 1 от 31 августа 2023 г.

© Брянский ГАУ, 2023
© Христофоров Е.Н., 2023
© Сакович Н.Е., 2023
© Адылин И.П., 2023

Содержание

Введение	5
1 Теория горения.....	7
1.1 Расчет количества воздуха, необходимого для горения веществ и материалов для индивидуальных химических соединений.....	7
1.2 Расчет количества воздуха, необходимого для горения веществ и материалов для сложной смеси веществ.....	9
2 Теория взрыва	17
2.1 Взрывы газозвудушных смесей в открытом пространстве.....	17
2.2 Взрывы пылевоздушных смесей в производственных помещениях	18
2.3 Взрывы газопаровоздушных смесей в помещениях	19
2.4 Взрывы конденсированных взрывчатых веществ	20
2.5 Взрывы на магистральных газопроводах	21
Практикум.....	23
1 Расчет количества воздуха, необходимого для горения веществ и материалов	23
1.1 Индивидуальное химическое соединение	23
1.2 Сложная смесь веществ	24
2 Расчет объема и состава продуктов горения.....	25
2.1 Индивидуальное химическое соединение	25
2.2 Сложная смесь веществ	27
2.3 Смесь газов	29
3 Концентрационные и температурные пределы воспламенения	30
3.1 Концентрационные пределы воспламенения	30
3.2 Температурные пределы воспламенения жидкостей	32
4 Теплота и температура горения.....	32
4.1 Теплота горения	32
4.2 Температура горения	35

5 Расчет избыточного давления при взрыве газопаровоздушных, пылевоздушных, газовоздушных смесей и конденсированных взрывчатых веществ.....	38
5.1 Взрывы газовоздушных смесей в открытом пространстве.....	38
5.2 Взрывы пылевоздушных смесей в производственных помещениях	38
5.3 Взрывы газопаровоздушных смесей в помещениях	39
5.4 Взрывы конденсированных взрывчатых веществ	40
5.5 Взрывы на магистральных газопроводах	40
Задачи для самостоятельного решения.....	42
Литература	55
ПРИЛОЖЕНИЯ	57

Введение

Непрерывный рост промышленного производства повышает уровень его негативного воздействия на окружающую среду, увеличивает вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера, связанных с пожарами и взрывами, особо недопустимы пожары и взрывы на атомных электростанциях, объектах химической, нефтяной и газовой промышленности, т.к. пожары на этих объектах наносят только материальный ущерб, в результате таких пожаров гибнут и травмируются люди.

В настоящее время проблема пожарной безопасности в России является весьма актуальной. По статистическим данным ежегодно количество пожаров достигает от 270 до 290 тысяч, а материальные потери составляют от 26 до 30 миллиардов рублей. Ежегодно огнем уничтожается более 2,5 млн. м² жилья, что равнозначно жилому фонду города с населением около 500 тысяч человек. Пожары в лесных массивах, торфяниках, на газовых, нефтяных месторождениях и предприятиях, на атомных электростанциях и других объектах сопряжены с огромным, подчас непоправимым экологическим ущербом.

Относительные показатели потерь от пожаров в России в 5...12 раз выше, чем в развитых странах мира и имеют выраженную тенденцию к росту из года в год.

Такое положение обусловлено кризисными явлениями в социально-экономической сфере, миграцией населения, криминализацией общества, пьянством. Одна из причин низкого уровня пожарной безопасности – недостаточное финансирование системы пожарной профилактики и защиты. Большая часть населения не имеет элементарных знаний по пожарной безопасности. На предприятиях часто недооценивается реальная опасность пожаров, не выполняются правила, отсутствует или не соблюдается противопожарный режим.

«Теория горения и взрыва» – учебная дисциплина, которая входит в базовую часть математического и естественнонаучного цикла (ФГОС ВПО-3) для бакалавров и является одной из основополагающих дисциплин, способствующих формированию у студентов знаний в области физико- химических процес-

сов и навыков технического мышления по предотвращению и прекращению чрезвычайных ситуаций, связанных с пожарами и взрывами.

В этих условиях изучение пожарной безопасности, теории горения и взрыва является важным, полезным и целесообразным.

1 Теория горения

1.1 Расчет количества воздуха, необходимого для горения веществ и материалов для индивидуальных химических соединений

Минимальное количество воздуха, необходимое для полного сгорания единицы количества горючего вещества (кмоль/кмоль; кг/кг; м³/м³), называется удельным теоретическим количеством воздуха и обозначается V_B^0 . При горении вещества в теоретическом количестве воздуха происходит образования продуктов только полного горения и в их составе отсутствует избыточный кислород.

Теоретическое количество воздуха (и любого другого окислителя) рассчитывается по уравнению химической реакции горючего с данной окислительной средой с учетом стехиометрических коэффициентов (стехиометрический коэффициент – это число, записанное перед атомами, ионами и молекулами в химической реакции, чтобы сбалансировать количество каждого элемента, как на стороне реагента, так и на стороне продукта уравнения).

В случае горения веществ в воздухе уравнение материального баланса может быть представлено в виде (для *индивидуальных химических веществ*):

$$a(G) + b[O_2] + b \times 3,76[N_2] = \sum_{i=1} m_i[III] + b \times 3,76[N_2] + Q, \quad (1.1)$$

где a – число молей горючего вещества;

b – число молей кислорода воздуха;

3,76 – число молей азота, приходящееся на 1 моль кислорода.

Q – теплота горения, кДж/кмоль, кДж/кг, кДж/м³.

При оценке количества воздуха необходимого для горения, все горючие вещества разделены на три группы:

– индивидуальные химические вещества, состав которых выражается химической формулой (C₂H₆, C₂H₅OH и др.);

– сложные смеси веществ, состав которых задается весовым процентом содержащихся в них элементов (древесина, торф и т.д.);

– смеси газов, такие как природный газ, водяной газ, генераторный газ, коксовый газ и т.п.

Удельное теоретическое количество воздуха можно рассчитать в кмоль на 1 кмоль горючего или в м³ на 1 м³ горючего газа или пара по следующей формуле:

$$V_B^0 = 4,76\beta, \quad (1.2)$$

а в м³ на 1 кг горючего по формуле

$$V_B^0 = \frac{4,76\beta V_t}{\mu_T}, \quad (1.3)$$

где $\beta = \frac{b}{a}$;

4,76 – количество воздуха, кмоль (м³, в котором содержится 1 кмоль кислорода);

μ_T – масса 1 кмоль горючего, кг/кмоль;

V_t – объем 1 кмоль воздуха при заданных условиях:

$$V_t = \frac{22,4T_T P_0}{T_0 P} \quad (1.4)$$

где T – температура, К;

P_0 – нормальное давление (101325 Па);

T_0 – нормальная температура (273 К);

P – давление, когда горючий газ (пар) и воздух находятся в одних и тех же условиях.

Формула (1.4) справедлива лишь для случая, когда горючий газ (пар) и воздух находятся при одних и тех же условиях. При других условиях формула принимает вид

$$V_B^0 = 4,76\beta \frac{V_t^B}{V_t^{T_3}}, \quad (1.5)$$

где V_t^B – объем 1 кмоль газа при температуре и давлении, при которых находится воздух, расходуемый на горение, м³/кмоль;

V_t^{I3} – объем 1 кмоль газа в условиях, при которых находится горючий газ (пар), м³/кмоль.

1.2 Расчет количества воздуха, необходимого для горения веществ и материалов для сложной смеси веществ

К *сложному типу веществ* относятся различные естественные и искусственные полимерные материалы, такие как древесина, торф, каменный уголь, нефть и продукты её переработки, резина, пластмассы и др. Состав таких веществ определяется по известным методикам в лабораториях и выражается, как правило, весовым процентным содержанием в них химических элементов. Для распространенных материалов это *C, H, O, S, N*. Кроме того, в состав горючих материалов входят также влага *W* и зола, неорганический остаток *A*.

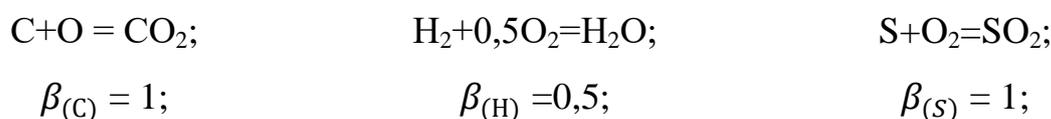
Например, вещество имеет состав: *C=50 %*, *H=5 %*, *S=5 %*, *O=10 %*, *N=10 %*, *W=10 %*, *A=10 %*. Это значит, что в 1 кг вещества содержится 0,5 кг углерода, 0,05 кг водорода, столько же серы, по 0,1 кг кислорода и азота, а также по 0,1 кг влаги и золы.

Кислород воздуха при горении таких веществ будет расходоваться на окисление *C, H, и S*, причем следует при этом учитывать, что кислород, содержащийся в веществе, уже использован на их частичное окисление. Таким образом, общий объем воздуха, необходимый для горения единицы массы вещества, будет складываться из объемов воздуха, необходимых для горения каждого из названных элементов, за вычетом объема воздуха, соответствующего количеству кислорода, содержащегося в веществе:

$$V_B^0 = V_{B(C)}^0 \frac{C}{100} + V_{B(H)}^0 \frac{H}{100} + V_{B(S)}^0 \frac{S}{100} - V_{B(O)}^0 \frac{O}{100} \quad (1.6)$$

где $V_{B(C).(H).(S)}^0$ – количество воздуха, необходимое для горения единицы массы соответствующего элемента, м³/кг;
 $V_{B(O)}^0$ – количество воздуха, в котором содержится 1 кг кислорода, м³/кг;
 С, Н, S, О – содержание соответствующего элемента в горючем веществе, вес %.

Величины $V_{B(C).(H).(S)}^0$ определим по формуле (1.3). Для этого составив уравнения реакций их горения, найдем коэффициенты a и b



Тогда,

$$V_{B(C)}^0 = \frac{4,76 \cdot 1 \cdot V_t}{12}, \quad V_{B(H)}^0 = \frac{4,76 \cdot 0,5 \cdot V_t}{2}, \quad V_{B(S)}^0 = \frac{4,76 \cdot 1 \cdot V_t}{32}.$$

Величину $V_{B(O)}^0$ определим из следующих соображений: 1 кмоль O₂ (32 кг) занимает объем V_t , так как в воздухе на каждый объем кислорода приходится 79:21=3,76 объема азота, то 32 кг кислорода будут содержаться в $4,76 \cdot V_t$ м³ воздуха. Тогда,

$$V_{B(O)}^0 = 4,76 \frac{V_t}{32}, \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Подставляя полученные значения $V_{B(C)}^0$, $V_{B(H)}^0$, $V_{B(S)}^0$, $V_{B(O)}^0$ в уравнение, получим:

$$V_{B(O)}^0 = \frac{4,76 V_t}{4 \cdot 100} \left(\frac{C}{3} + H + \frac{S - O}{8} \right) \quad (1.7)$$

Для нормальных условий, когда $V_t = 22,4$ м³/кг, уравнение (1.7) примет вид

$$V_{B(O)}^0 = 0,267 \left(\frac{C}{3} + H + \frac{S - O}{8} \right), \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (1.8)$$

В случае смеси газов объем воздуха, необходимый для полного сгорания смеси газов, можно определить по формулам (1.2) и (1.4). Для этого необходимо провести расчет для каждого компонента смеси отдельно и полученные результаты сложить.

Когда газовая смесь и воздух находятся в одинаковых условиях, объем воздуха, необходимый для полного сгорания смеси газов, определяется по формуле

$$V_{B(O)}^0 = \frac{4,76}{100} (\sum_{i=1}^n \beta_i \varphi_i - \varphi_{O_2}) \quad (1.9)$$

где φ_i - содержание i -го горючего компонента в газовой смеси, об. %;

n - количество горючих компонентов газовой смеси;

φ_{O_2} - содержание кислорода в газовой смеси, об. %.

Формулы (1.2) – (1.5), (1.7) – (1.9) можно использовать для расчета объема окислительной среды, необходимого для полного сгорания веществ, содержание кислорода в которой отличается от 21%:

$$V_{CP}^0 = V_B^0 \frac{100}{4,76 \cdot \varphi_{O_2}} = V_B^0 \frac{21}{\varphi_{O_2}},$$

где $V_{B(O)}^0$ – объем воздуха, рассчитанный по формулам (1.2) – (1.5), (1.7) – (1.9);

φ_{O_2} – содержание кислорода в окислительной среде, объемные проценты.

В реальных условиях количество поступающего в зону горения воздуха отличается от теоретически требуемого для полного сгорания горючего вещества. Для характеристики степени обеспеченности зоны горения окислителем (воздухом) вводят понятие *коэффициента избытка воздуха* α_B (коэффициент избытка воздуха для горючей стехиометрической смеси равен единице; стехиометрическая смесь – это смесь, состав которой обеспечивает полное сгорание топлива без остатка избыточного кислорода; например, для двигателей внутреннего сгорания с искровым зажиганием, стехиометрическим считается

соотношение воздух/топливо для бензина равно 14,7:1 (массовые части), для пропана – 15,6:1), который показывает, во сколько раз объем воздуха поступающий в зону горения, больше объема воздуха, теоретически необходимого для полного сгорания единицы количества горючего вещества:

$$\alpha_B = \frac{V_B^{PP}}{V_B^0}, \text{ кмоль/кмоль, м}^3/\text{кг, м}^3/\text{м}^3,$$

где V_B^{PP} – объем воздуха, поступающего в зону горения на единицу количества горючего вещества, кмоль/кмоль; $\text{м}^3/\text{кг}$; $\text{м}^3/\text{м}^3$.

В случае кинетического горения при $V_B^{PP} = V_B^0$ и $\alpha_B = 1$ смесь горючего с воздухом является стехиометрической.

При $\alpha_B < 1$ – смесь «богатая», характерной чертой процесса горения является образование продуктов неполного горения.

При $\alpha_B > 1$ смесь «бедная» и часть воздуха, не израсходованная на горение (избыток воздуха), переходит в продукты горения:

$$\Delta V_B = V_B^{PP} - V_B^0 = V_B^0 (\alpha_B - 1) \quad (1.10)$$

Существуют предельные значения коэффициента избытка воздуха α_{min} и α_{max} , соответствующие смесям горючего с воздухом предельной состава. Минимальный коэффициент избытка воздуха α_{min} соответствует верхнему концентрационному пределу воспламенения, а α_{max} – нижнему концентрационному пределу воспламенения. Для парогазовоздушных смесей их значения могут быть вычислены по формуле

$$\alpha_{min,max} = \frac{100 - C_{B(H)}}{V_B^0 C_{B(H)}} \quad (1.11)$$

где $C_{B(H)}$ – соответственно верхний или нижний концентрационные пределы воспламенения горючего в смеси с воздухом, объемные проценты;

V_B^0 - теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания единицы количества горючего, кмоль/кмоль, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Если известно содержание кислорода в продуктах горения, то α_B можно оценить по формуле

$$\alpha_B = \frac{21}{21 - c_{O_2}^{III}}$$

где $c_{O_2}^{III}$ – концентрация кислорода в продуктах горения, объемные проценты.

Несмотря на то, что в реальных условиях горения в ограниченном объеме коэффициент избытка воздуха, как правило, превышает единицу, наблюдается образование продуктов неполного горения. Это связано с тем, что в контакт и реакцию горения с горючими веществами за счет диффузии вступает только часть поступающего в помещение воздуха, а остальной воздух смешивается с продуктами горения.

Существенную роль в процессе горения и распространения горения играют продукты горения, под которыми следует понимать продукты химической реакции горючего вещества с окислителем.

Существуют продукты *полного* и *неполного* горения. Если окислителя в зону горения поступает достаточно для полного окисления горючего, то образуются продукты полного горения. Если окислителем является кислород воздуха, а *горючим* – вещества, содержащие углерод, водород, серу, то продуктами полного горения являются CO_2 , O_2 , H_2O , SO_2 , N_2 . Азот поступает с воздухом, но может и образоваться в результате химической реакции, если он содержался в горючем. Когда в зону горения поступает больше воздуха, чем его требуется для полного сгорания горючего ($\alpha > 1$), в состав продуктов горения будет входить кислород. Если в зону горения поступает воздуха меньше, чем необходимо для полного сгорания горючего вещества, образуются продукты неполного горения, к которым относятся оксид углерода, углерод (сажа), различные продукты термоокислительного разложения исходного горючего вещества.

При горении веществ и материалов при условии $\alpha \geq 1$ можно рассчитать состав и объем продуктов горения, который необходим для определения температуры горения веществ и материалов.

В общем случае объем продуктов горения определяется по формуле

$$V_{П.Г} = V_{П.Г}^0 + \Delta V_B, \quad (1.12)$$

где $V_{П.Г}^0$ – теоретический объем продуктов горения, кмоль/кмоль, м³/кг; м³/м³;
 ΔV_B – избыток воздуха, рассчитываемый по формуле (1.10), кмоль/кмоль, м³/кг, м³/м³.

Расчетный объем продуктов горения определяется так же для трех различных групп веществ и материалов.

Объем продуктов горения так же, как и воздуха для горения, определяется с помощью уравнения химической реакции (1.1), только все соотношения берутся между количеством горючего и образующимися в результате реакции продуктами горения. Например, для расчета количества продуктов горения:

Например, для расчета количества продуктов горения:

- в киломолях на 1 кмоль горючего используется формула

$$V_{П.Г}^0 = \sum_{i=1}^k \frac{b}{a} + 3,76 \frac{b}{a} \quad (1.13)$$

- в м³ на 1 кг горючего - формула

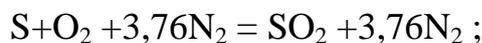
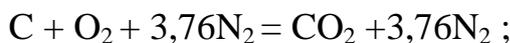
$$V_{П.Г}^0 = \left(\sum_{i=1}^k \frac{b}{a} + 3,76 \frac{b}{a} \right) \frac{V_t^{П.Г}}{M_{ГЗ}} \quad (1.14)$$

- в м³ на 1 м³ горючего газа или пара – формула

$$V_{П.Г}^0 = \left(\sum_{i=1}^k \frac{b}{a} + 3,76 \frac{b}{a} \right) \frac{V_t^{ПюГ}}{V_t^{ГЗ}} \quad (1.15)$$

где $V_t^{П.Г}$ - объем 1 кмоль газа при температуре и давлении продуктов горения, м³/кмоль.

В случае сложной смеси химических соединений объем продуктов горения складывается из объемов продуктов, выделяющихся при сгорании каждого из элементов входящих в состав горючего:



Другие компоненты горючих веществ N, W, A, O негорючие, однако они будут входить в продукты горения.

Кислород, содержащийся в горючем веществе, будет снижать содержание азота в продуктах горения. Продукты горения будут состоять из углекислого газа (CO_2), образующегося при горении углерода; водяных паров, образующихся при горении водорода и испарений влаги; оксида серы IV (SO_2), образующейся при горении серы; азота (N_2), образующегося из горючего вещества и из воздуха, израсходованного на горение C, H, S.

$$V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} \cdot \frac{C}{100} = 1,86 \frac{C}{100}, \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2} \cdot \frac{H}{100} + \frac{22,4}{18} \cdot \frac{W}{100} = 11,2 \frac{H}{100} + 1,24 \frac{W}{100}, \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V_{SO_2} = \frac{22,4}{32} \cdot \frac{S}{100} = 0,7 \frac{S}{100}, \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V_{N_2}^0 = \frac{3,76 \cdot 22,4}{12} \cdot \frac{C}{100} + \frac{3,76 \cdot 22,4}{2} \cdot \frac{H}{100} + \frac{22,4}{28} \cdot \frac{N}{100} + \frac{3,76 \cdot 22,4}{32} \cdot \left(\frac{S - O}{100} \right)$$

или

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V_B^0 + 0,8 \cdot \frac{N}{100}$$

где C, H, S, N, O, W - содержание компонентов в весовых процентах (W - влага).

Объем и состав продуктов горения для смеси газов определяется по уравнениям реакции горения для каждого горючего компонента входящего в смесь. Негорючие компоненты переходят в продукты горения, а содержание кислорода в смеси снижает количество азота в продуктах. Следует учитывать избыток воздуха.

2 Теория взрыва

В данном разделе приведем расчеты избыточного давления при взрыве газопаровоздушных, пылевоздушных, газовоздушных смесей и конденсированных взрывчатых веществ.

2.1 Взрывы газовоздушных смесей в открытом пространстве

При взрыве газовоздушной смеси различают две зоны действия:

- детонационной волны – в пределах облака ГВС;
- воздушной ударной волны – за пределами облака ГВС.

В облаке действует детонационная волна, избыточное давление во фронте которой принимается постоянным в пределах облака ГВС и приблизительно равным $\Delta P_{\phi} = 17 \text{ кгс/см}^2$ (1,7 кПа).

В расчетах принимают, что зона действия детонационной волны ограничена радиусом r_0 , который принимается из допущения, что ГВС после разрушения емкости образует в открытом пространстве полусферическое облако. Объем полусферического облака может быть определен по формуле

$$V = \frac{2}{3} \pi \cdot r_0^3, \text{ м}^3. \quad (2.1)$$

Учитывая, что 1 кмоль идеального газа при нормальных условиях занимает $22,4 \text{ м}^3$, объем образовавшейся смеси составит

$$V = \frac{22,4 \cdot k \cdot m_{\Gamma} \cdot 100}{\mu_{\Gamma} \cdot C_{\text{СТХ}}}, \quad (2.2)$$

где k – коэффициент, учитывающий долю активного газа (долю продукта, участвующего во взрыве);

m_{Γ} – количество сжиженных углеводородных газов в хранилище до взрыва, кг;

μ_{Γ} – молярная масса, кг/моль;

$C_{\text{СТХ}}$ – стехиометрическая концентрация газа, %.

Из условия равенства полусферы и объема образовавшейся смеси получим

$$r_0 \approx 14,53 \sqrt{\frac{m_{\Gamma} \cdot k}{\mu_{\Gamma} \cdot C_{СТХ}}}, \text{ м.} \quad (2.3)$$

Значение коэффициента k принимают в зависимости от способа хранения продукта: $k = 1$ – для резервуаров с газообразным веществом; $k = 0,6$ – для газов, сжиженных под давлением; $k = 0,1$ – для газов, сжиженных под охлаждением (хранящихся в изотермических емкостях); $k = 0,05$ – при аварийном разливе легковоспламеняющейся жидкости.

Зона действия ударной волны начинается сразу за внешней границей облака ГВС. Давление во фронте воздушной ударной волны ΔP_{Φ} зависит от расстояния от центра взрыва и определяется по таблице П7 приложения.

2.2 Взрывы пылевоздушных смесей в производственных помещениях

Взрывное горение может происходить по одному из двух режимов: дефлаграционному и детонационному. При разработке плана действий для оперативного прогнозирования энергия взрыва будет определяться по формуле

$$Q = m \cdot U, \text{ кДж,} \quad (2.4)$$

где m – расчетная масса пыли;

U – удельная теплота сгорания вещества, превратившегося в пыль, кДж.

При оперативном прогнозировании расчетная масса пыли определяется из условия, что свободное помещение полностью заполнит взвешенный дисперсный продукт, образующий при этом пылевоздушную смесь стехиометрической концентрации:

$$m = \frac{V_0 \cdot C_{СТХ}}{1000}, \text{ кг,} \quad (2.5)$$

где $V_0 = 0,8V_{\text{п}}$, м^3 - свободный объем помещения;

$C_{\text{СТХ}} = 3\varphi_{\text{нкр}}$ - стехиометрическая концентрация пыли;

$\varphi_{\text{нкр}}$ - нижний концентрационный предел распространения пламени (минимальное содержание пыли в смеси с воздухом, при котором возможно возгорание).

2.3 Взрывы газопаровоздушных смесей в помещениях

При взрыве газопаровоздушных смесей (ГПВС) зону детонационной волны, ограниченную радиусом, можно определить по формуле

$$r_0 = \frac{1}{24} \sqrt[3]{Q}, \quad (2.6)$$

где $1/24$ - коэффициент, $\text{м/кДж}^{1/3}$;

Q – энергия взрыва смеси, определяемая из выражения:

$$Q = V_{\text{ГПВС}} \cdot \rho_{\text{СТХ}} \cdot U, \quad (2.7)$$

где $\rho_{\text{СТХ}}$ - плотность смеси стехиометрического состава, кг/м^3 ;

Q - энергия взрывчатого превращения единицы массы смеси стехиометрического состава, кДж/кг ;

$V_{\text{ГПВС}}$ - объем смеси, равный

$$V_{\text{ГПВС}} = \frac{C_{\text{СТХ}} \cdot V_{\text{ПЗ}}}{100}, \quad (2.8)$$

где $C_{\text{СТХ}}$ – стехиометрическая концентрация по объему, %;

$V_{\text{ПЗ}}$ – объем газа в помещении, м^3 .

Для оперативного прогнозирования последствий взрыва в производственных помещениях целесообразно производить расчеты для случая, при котором будут максимальные разрушения. Тогда следует считать, что свободный объем помещения, где расположены емкости с газом, будет полностью запол-

нен взрывоопасной смесью стехиометрического состава и уравнение по определению энергии взрыва будет иметь вид

$$Q = \frac{c_{CTX} V_0 \cdot \rho_{CTX} U}{100}, \text{ кДж} \quad (2.9)$$

где $V_0 = 0,8V_{\text{ПОМ}}$, м³ - свободный объем помещения;
 $V_{\text{ПОМ}}$ - общий объем помещения, м³.

Объем смеси $V_{\text{ГПВС}}$ принимают равным V_0 .

2.4 Взрывы конденсированных взрывчатых веществ

Параметры взрыва конденсированных взрывчатых веществ (КВВ) зависят от вида взрывчатых веществ, эффективной массы, характера подстилающей поверхности и расстояния до центра взрыва. Расчет проводят в два этапа. В начале определяют приведенный радиус R' для рассматриваемых расстояний, а затем избыточное давление ΔP_{Φ} во фронте воздушной ударной волны. Приведенный радиус в зоне взрыва определяют по формуле

$$R' = \frac{R}{\sqrt[3]{2\eta m K_{\text{эфф}}}}, \text{ м/кг}, \quad (2.10)$$

где R – расстояние до центра взрыва взрывчатых веществ, м;

η – коэффициент, учитывающий характер подстилающей поверхности: для металла он равен 1; для бетона - 0,95; для грунта и дерева 0,6-0,8;

m – масса взрывчатого вещества;

$K_{\text{эфф}}$ – коэффициент приведения рассматриваемого вида взрывчатых веществ к тротилу, определяется по таблице приложения П9.

В зависимости от величины приведенного радиуса избыточное давление может быть определено по одной из следующих формул:

при $R' \leq 6,2$

$$\Delta P_{\phi} = \frac{700}{3[\sqrt{1+(R')^3}-1]}, \text{ кПа} \quad (2.11)$$

при $R' > 6,2$

$$\Delta P_{\phi} = \frac{700}{3\sqrt{\lg R'-0,332}}, \text{ кПа} \quad (2.12)$$

2.5 Взрывы на магистральных газопроводах

Взрывное горение может происходить по дефлаграционному и детонационному режимам. При оперативном прогнозировании следует принимать, что процесс развивается в детонационном режиме.

Дальность распространения облака взрывной смеси в направлении ветра определяется по формуле

$$L_{\text{обл}} = 25 \sqrt{\frac{M_{\Gamma}}{W_{\text{вт}}}}, \text{ м}, \quad (2.13)$$

где 25 – постоянная;

M_{Γ} – массовый расход газа, кг/с;

$W_{\text{вт}}$ – скорость ветра, м/с.

Граница зоны детонации, ограниченная радиусом r_0 , в результате утечки газа за счет нарушения герметичности газопровода может быть определена по формуле

$$r_0 = 12,5 \sqrt{\frac{M_{\Gamma}}{W_{\text{вт}}}}, \text{ м}. \quad (2.14)$$

Массовый секундный расход газа M_{Γ} из газопровода для критического режима истечения, когда основные параметры (расход и скорость) истечения зависят только от параметров разгерметизированного трубопровода, может быть определен по формуле

$$M_{\Gamma} = \psi S \mu \sqrt{\frac{P_{\Gamma}}{V_{\Gamma}}}, \text{ кг/с}, \quad (2.15)$$

где ψ – коэффициент, учитывающий расход газа в зависимости от состояния потока (для звуковой скорости истечения $\psi = 0,7$);

S – площадь отверстия утечки, принимается равной площади сечения трубопровода, м^2 ;

μ – коэффициент расхода, учитывающий форму отверстия (в расчетах принимается равным 0,8);

P_{Γ} – давление на газопроводе, Па;

V_{Γ} – удельный объем транспортируемого газа, определяемый по формуле

$$V_{\Gamma} = R_0 \frac{T}{P_{\Gamma}}, \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (2.16)$$

где T – температура транспортируемого газа, К;

R_0 – удельная газовая постоянная, равная 486 Дж/(кг•К).

При разработке планов действий на схеме объекта вдоль магистральных нефте- и газопроводов рекомендуется наносить зоны возможных сильных разрушений, границы которых определяются величиной критического избыточного давления 50 кПа.

При проведении оперативных расчетов следует учитывать, что в зависимости от класса магистрального трубопровода рабочее давление газа в нем может составлять: для газопроводов высокого давления – 2,5 МПа, среднего давления 1,2-2,5 МПа; низкого давления – до 1,2 МПа. Диаметр газопровода может быть 150-1420 мм. Температура транспортируемого газа может быть принята в расчетах равной 40°C. Состав обычного газа при отсутствии данных можно принять в соотношении: метан – 90%, этан – 4%, пентан – 2%, бутан – 2%, изо-пентан – 2%.

Практикум

1 Расчет количества воздуха, необходимого для горения веществ и материалов

1.1 Индивидуальное химическое соединение

Пример 1. Определить объем воздуха необходимого для полного сгорания бензола и его паров при $T=300$ К, $P=90000$ Па в следующих физических величинах: кмоль/кмоль, $\text{м}^3/\text{м}^3$, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Решение.

В формулы (1.2 – 1.5) входит величина β , для определения которой необходимо знать стехиометрические коэффициенты a и b :



Из (1.1) и $\beta = \frac{b}{a}$ следует, что $\beta = 7,5$ кмоль/кмоль.

Из (1.2) следует, что теоретическое количество воздуха на количество горючего равно (кмоль/кмоль, $\text{м}^3/\text{м}^3$):

$$V_B^0 = 4,78\beta = 4,78 \cdot 7,5 = 35,85 \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}, \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}.$$

Для определения объем воздуха необходимого для полного сгорания бензола в $\text{м}^3/\text{кг}$ необходимо использовать формулу (1.3), таким образом, первоначально найдем объем 1 кмоль воздуха при заданных условиях V_t , по формуле (1.4):

$$V_t = \frac{22,4 \times 300 \times 101325}{273 \times 90000} = 27,71 \text{ м}^3/\text{моль}.$$

Массу 1 кмоль горючего определяем в соответствии с таблицей Менделеева (приложение П10) и химической формулой горючего вещества.

При этом масса 1 кмоль C_6H_6 равна:

$$\mu_T = 12 \cdot 6 + 1 \cdot 6 = 78 \text{ кг/кмоль},$$

где 12 – относительная атомная масса углерода С,
 6 – число атомов углерода в молекуле горючего, шт.,
 1 – относительная атомная масса водорода Н,
 6 – число атомов водорода в молекуле горючего, шт.

Применяя формулу (1.3) получим

$$V_B^0 = \frac{4,76 \cdot 7,5 \cdot 27,71}{78} = 12,68 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

1.2 Сложная смесь веществ

Пример 2. При проведении экспертизы пожара в замкнутом помещении объемом 100 м³ выяснилось, что в результате сгорания торфа, состоящего из: С=40 %, Н=4 %, О=10%, N=16%, A=15%, концентрация кислорода снизилась до $\varphi_{O_2} = 16 \%$. Для определения ориентировочного времени начала пожара необходимо рассчитать количество сгоревшего вещества, если T=300 К, P=90000 Па.

Решение. Считая, что изменение концентрации кислорода в среде помещения происходило только за счет его расходования на горение, определим объем израсходованного на горение воздуха и приведем его к нормальным условиям. Согласно формуле (1.4) при уменьшении кислорода до 16% объем воздуха, израсходованного на этот процесс, будет рассчитываться по формуле

$$V_B = \frac{V_{\text{пом}} \cdot (21 - \varphi_{O_2}) \cdot 4,76 \cdot P_0 \cdot T}{100 \cdot T_0 \cdot P} = \frac{100 \cdot (21 - 16) \cdot 4,76 \cdot 101325 \cdot 300}{100 \cdot 273 \cdot 90000} = 29,4 \text{ м}^3$$

По формуле (1.8) найдем удельное теоретическое количество воздуха для горения торфа:

$$V_B^0 = 0,267 \left(\frac{40}{3} + 4 + \frac{10}{8} \right) = 4,96 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Определим количество сгоревшего торфа:

$$m = \frac{V_B}{V_B^0} = \frac{29,4}{4,96} = 5,9 \text{ кг.}$$

2 Расчет объема и состава продуктов горения

2.1 Индивидуальное химическое соединение

Пример 3. Определить объем и состав продуктов горения бензола и его паров в кмоль/кмоль, м³/м³, м³/кг, если $\alpha = 1,5$, $T = 1600 \text{ К}$, $P = 90000 \text{ Па}$.

Решение.

Объем продукта горения определим по формуле (1.14). Для расчета воспользуемся формулами (1.12) - (1.15) и уравнением реакции горения бензола в воздухе из примера.

Из уравнения реакции можно записать:

$$m_{CO_2} = 6; m_{H_2O} = 3; \alpha = 1; \beta = 7,5.$$

Найдем расчетный объем продуктов по формуле (1.13):

$$V_{П.Г}^0 = \frac{6}{1}(CO_2) + \frac{3}{1}(H_2O) + \frac{3,76 \cdot 7,5}{1}(N_2) = 37,2, \text{ кмоль/кмоль.}$$

Определим избыточный объем воздуха V_B^0 :

$$V_B^0 = 4,76 \times 7,5 = 35,6, \text{ кмоль/кмоль.}$$

$$\Delta V_B = V_B^0(\alpha - 1) = 35,6(1,5 - 1) = 17,8, \text{ кмоль/кмоль}$$

Рассчитаем объем продуктов горения по формуле (1.12):

$$V_{П.Г.} = V_{П.Г.}^0 + \Delta V_B = 37,2 + 17,8 = 55,0, \text{ кмоль/кмоль.}$$

Таким образом, при сгорании 1 кмоль бензола при $\alpha = 1,5$ выделится 55,0 кмоль продуктов горения, имеющих следующий состав:

$$C_{CO_2} = \frac{V_{CO_2} \cdot 100}{V_{ПГ}} = \frac{6 \cdot 100}{55} = 10,9 \%,$$

$$C_{H_2O} = \frac{V_{H_2O} \cdot 100}{V_{ПГ}} = \frac{3 \cdot 100}{55} = 5,45 \%,$$

$$C_{N_2} = \frac{(V_{N_2} + \Delta V_B \cdot 0,79) \cdot 100}{V_{ПГ}} = \frac{(3,76 \cdot 7,5 + 17,85 \cdot 0,79) \cdot 100}{55} = 76,91 \%,$$

$$C_{O_2} = \frac{V_{O_2} \cdot 100}{V_{ПГ}} = \frac{17,85 \cdot 0,21 \cdot 100}{55} = 6,75 \%.$$

Для нахождения объемов продуктов горения в $\text{м}^3/\text{кг}$ и $\text{м}^3/\text{м}^3$ определим объем 1 кмоль газа при условиях, в которых находятся продукты горения, по формуле (1.4):

$$V_t = \frac{22,4 \cdot 1600 \cdot 101325}{273 \cdot 90000} = 147,8 \text{ м}^3/\text{кмоль}.$$

Тогда в соответствии с формулой (1.14)

$$V_{ПГ}^0 = \left[\frac{6}{1} (CO_2) + \frac{3}{1} (H_2O) + \frac{3,76 \cdot 7,5}{1} (N_2) \right] \frac{147,8}{78} = 70,5 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Рассчитаем избыточный объем воздуха:

$$\Delta V_B = \frac{4,76 \cdot 7,5 \cdot 147,8}{78} (1,5 - 1) = 33,8 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем продуктов горения составит

$$V_{ПГ.} = 70,5 + 33,8 = 104,3 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Считая, что пары бензола имеют нормальную температуру 273К, определим теоретический объем продуктов горения в м³/м³ по формуле (1.15):

$$V_{П.Г.}^0 = \left[\frac{6}{1} (CO_2) + \frac{3}{1} (H_2O) + \frac{3,76 \cdot 7,5}{1} (N_2) \right] \frac{147,8}{22,4} = 218,1 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Рассчитаем избыточный объем воздуха:

$$\Delta V_B = \frac{4,76 \cdot 7,5 \cdot 147,8}{22,4} (1,5 - 1) = 117,7 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Тогда,

$$V_{П.Г.} = 218,1 + 117,7 = 335,8 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

2.2 Сложная смесь веществ

Пример 4. Определить состав и количество 1 м³ продуктов горения при горении 1 кг керосина состава: С = 85%, Н = 11%, S = 0,5%, О = 1%, N = 1%, W=1,5%, если температура продуктов горения составляет 1300°С, давление – 101325 Па, а коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,5$.

Решение.

Определим расчетный объем продуктов горения:

$$V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} \cdot \frac{C}{100} = 1,86 \frac{85}{100} = 1,58 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{4} \cdot \frac{H}{100} + \frac{22,4}{18} \cdot \frac{W}{100} = 11,2 \frac{11}{100} + 1,24 \frac{1,5}{100} = 1,24 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$V_{SO_2} = \frac{22,4}{32} \cdot \frac{S}{100} = 0,7 \frac{0,5}{100} = 0,0035 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$V_{N_2} = \frac{3,76 \cdot 22,4}{12} \cdot \frac{C}{100} + \frac{3,76 \cdot 22,4}{2} \cdot \frac{H}{100} + \frac{22,4}{28} \cdot \frac{N}{100} + \frac{3,76 \cdot 22,4}{32} \cdot \left(\frac{S - O}{100} \right) =$$

$$= 0,01[7 \cdot 85 + 21 \cdot 11 + 0,8 \cdot 1 + 2,63 \cdot (0,5 - 1)] = 8,263 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$V_{\text{П.Г.}}^0 = 1,58 + 1,24 + 0,0035 + 8,263 = 11,087 \text{ , м}^3/\text{кг}.$$

Рассчитаем избыток воздуха:

$$\Delta V_B = 0,267 \left(\frac{C}{3} + H + \frac{S-O}{8} \right) (1,5 - 1) = 0,267 \left(\frac{85}{3} + 11 + \frac{0,5-1}{8} \right) 0,5 = 5,24 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Определим общий объем продуктов горения при нормальных условиях:

$$V_{\text{П.Г.}} = V_{\text{П.Г.}}^0 + \Delta V_B = 11,087 + 5,24 = 16,33 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Найдем процентный состав продуктов горения:

$$C_{CO_2} = \frac{V_{CO_2} \cdot 100}{V_{\text{П.Г.}}} = \frac{1,58 \cdot 100}{16,33} = 9,68 \%,$$

$$C_{H_2O} = \frac{V_{H_2O} \cdot 100}{V_{\text{П.Г.}}} = \frac{1,24 \cdot 100}{16,33} = 7,6 \%,$$

$$C_{SO_2} = \frac{V_{SO_2} \cdot 100}{V_{\text{П.Г.}}} = \frac{0,0035 \cdot 100}{16,33} = 0,02 \%,$$

$$C_{N_2} = \frac{(V_{N_2} + \Delta V_B \cdot 0,79) \cdot 100}{V_{\text{П.Г.}}} = \frac{(8,236 + 5,223 \cdot 0,79) \cdot 100}{16,33} = 75,79 \%,$$

$$C_{O_2} = \frac{\Delta V_B \cdot 100}{V_{\text{П.Г.}}} = \frac{5,223 \cdot 0,21 \cdot 100}{16,33} = 6,72 \%.$$

Приведем объем продуктов горения к заданным условиям: $t_{\Gamma} = 1300 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
 $P = 101325 \text{ Па}$.

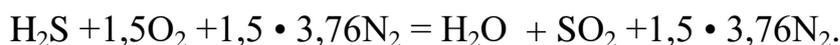
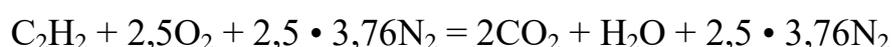
$$V_{\text{П.Г.}}^{t_{\Gamma}} = V_{\text{П.Г.}} \frac{T_{\Gamma} \cdot P_0}{T_0 \cdot P} = 16,33 \frac{(1300+273) \cdot 101325}{273 \cdot 101325} = 94,1 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

2.3 Смесь газов

Пример 5. Определить объем и состав продуктов горения 1 м³ газовой смеси состава $C_{C_2H_2} = 50\%$, $C_{CO} = 10\%$, $C_{H_2S} = 10\%$, $C_{N_2} = 10\%$, $C_{CO_2} = 10\%$, $C_{O_2} = 10\%$, если избыток воздуха составляет 40%, а температура продуктов горения 1000°C. Давление нормальное. Температура газовой смеси 20°C.

Решение.

Запишем уравнения реакций горения горючих компонентов смеси в воздухе:



Найденные объемы продуктов горения для различных газов смеси приведены в таблице 2.3.1.

Таблица 2.3.1 – Исходные данные для расчетов. Объемы продуктов горения для различных газов смеси

Компонент смеси	Содержание в 1 м ³	Объем продуктов горения, м ³			
		CO ₂	H ₂ O	SO ₂	N ₂
C ₂ H ₂	0,5	2 × 0,5	1 × 0,5	-	2,5 × 3,76 × 0,5
CO	0,1	0,1	-	-	0,5 × 3,76 × 0,1
H ₂ S	0,1	-	1 × 0,1	1 × 0,1	1,5 × 3,76 × 0,1
CO ₂	0,1	0,1	-	-	-
N ₂	0,1	-	-	-	-0,1
O ₂	0,1	-	-	-	-3,76 × 0,1
Итого	1,0	1,2	0,6	0,1	5,18

Рассчитаем избыток воздуха:

$$\Delta V_B = \frac{2,5 \cdot 50 + 0,5 \cdot 10 + 1,5 \cdot 10 - 10}{21} (1,4 - 1) = 2,57 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Определим общий объем продуктов горения при нормальных условиях:

$$V_{\text{П.Г.}} = 1,2 + 0,6 + 5,18 + 2,57 = 9,65 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Найдем процентный состав продуктов горения:

$$C_{CO_2} = \frac{V_{CO_2} \cdot 100}{V_{\text{П.Г.}}} = \frac{1,2 \times 100}{9,65} = 12,42 \%,$$

$$C_{H_2O} = \frac{V_{H_2O} \cdot 100}{V_{\text{П.Г.}}} = \frac{0,6 \times 100}{9,65} = 6,21 \%,$$

$$C_{SO_2} = \frac{V_{SO_2} \cdot 100}{V_{\text{П.Г.}}} = \frac{0,1 \times 100}{9,65} = 1,04 \%,$$

$$C_{N_2} = \frac{(V_{N_2} + \Delta V_B \cdot 0,79) 100}{V_{\text{П.Г.}}} = \frac{(5,18 + 2,57 \times 0,79) 100}{9,65} = 74,72 \%,$$

$$C_{O_2} = \frac{\Delta V_{O_2} \cdot 100}{V_{\text{П.Г.}}} = \frac{2,57 \times 0,21 \times 100}{9,65} = 5,6 \%.$$

Определим объем продуктов горения

$$V_{\text{П.Г.}}^{t_{\Gamma}} = V_{\text{П.Г.}} \frac{T_{\Gamma} P_0}{T_0 P} = 9,65 \frac{(1000 + 273) \times 101325}{273 \times 101325} = 49,1 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

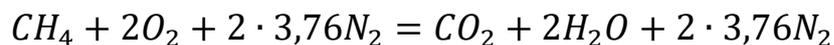
3 Концентрационные и температурные пределы воспламенения

3.1 Концентрационные пределы воспламенения

Пример 6. Определить концентрационные пределы воспламенения метана CH_4 и низшую теплоту горения метана.

Решение.

Запишем термохимическое уравнение горения метана:



По значениям таблицы 3.1.1 определяем значения констант для нижнего концентрационного предела воспламенения (НКПВ) и верхнего концентрационного предела воспламенения (ВКПВ).

НКПВ и ВКПВ ориентировочно можно определить по следующей зависимости:

$$C_{H(B)} = \frac{100}{a^* \cdot n^* + b^*},$$

где n^* – число молекул кислорода в уравнении горения;

a^*, b^* – постоянные.

Таблица 3.1.1 – Значения постоянных a^*, b^*

Пределы воспламенения	Значения постоянных	
	a^*	b^*
НКПВ	8,684	4,679
ВКПВ	$n^* < 7,5$	1,55
	$n^* > 7,5$	0,768
		0,560
		0,554

Таким образом,

$$\text{НКПВ: } a^* = 8,684, b^* = 4,679^*;$$

$$\text{ВКПВ: } a^* = 1,55, b^* = 0,56.$$

Используя вышеприведенную формулу и данные таблицы 3.1.1, имеем

$$C_H = \frac{100}{8,684 \times 2 + 4,679} = 4,55 \%,$$

$$C_B = \frac{100}{1,55 \times 2 + 0,56} = 27,3 \%.$$

3.2 Температурные пределы воспламенения жидкостей

Пример 7. Определить температурные пределы воспламенения ацетона, если концентрационные пределы составляют: НКПВ = 2,2%, ВКПВ = 13%. Атмосферное давление равно 101325 Па.

Решение.

Находим давление насыщенных паров жидкости, соответствующее нижнему и верхнему пределам воспламенения:

$$P_{Н.П} = \frac{2,2 \times 101325}{100} = 2229,2 \text{ Па};$$

$$P_{В.П} = \frac{13 \times 101325}{100} = 13172,3 \text{ Па}.$$

По таблице П1 приложения определяем, что нижний температурный предел воспламенения ацетона находится между температурами 241,9 и 252,2 К при давлении $P_{\min} = 1333,2$ Па и $P_{\max} = 2666,4$, а верхний – между 271,0 и 280,7 К при давлении $P_{\min} = 7999,3$ Па и $P_{\max} = 13332,3$. Методом линейной интерполяции определяем нижний и верхний температурные пределы воспламенения:

$$T_H = T_{\min} + \frac{(T_{\max} - T_{\min})(P_H - P_{\min})}{P_{\max} - P_{\min}};$$

$$T_B = T_{\min} + \frac{(T_{\max} - T_{\min})(P_B - P_{\min})}{P_{\max} - P_{\min}}.$$

$$T_H = 241,9 + \frac{(252,2 - 241,9)(2229,2 - 1333,2)}{2666,4 - 1333,2} = 248,8 \text{ К};$$

$$T_B = 271,0 + \frac{(280,7 - 271,0)(13172,3 - 7999,3)}{13332,3 - 7999,3} = 280 \text{ К}.$$

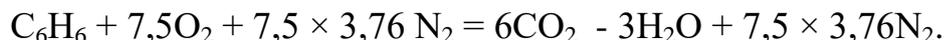
4 Теплота и температура горения

4.1 Теплота горения

Пример 8. Рассчитать по закону Гесса низшую теплоту горения бензола в кДж/моль и кДж/м³.

Решение.

Запишем уравнение реакции горения бензола в воздухе:



Уравнение закона Гесса для этого случая будет выглядеть так:

$$Q_H = -(6\Delta H_{\text{CO}_2} + 3\Delta H_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta H_{\text{C}_6\text{H}_6}).$$

Значения величины ΔH^0 для CO_2 , H_2O и C_6H_6 возьмем из таблицы ПЗ приложения:

$$Q_H = 6 \times 396,9 + 3 \times 242,2 - (-34,8) = 3142,8 \cdot 10^3, \text{ кДж/кмоль.}$$

Низшую теплоту сгорания 1 кг бензола найдем исходя из закона Авогадро и определения киломоля. При сгорании 1 кмоль = 78 кг выделяется тепла $3142,8 \cdot 10^3$ кДж; при сгорании 1 кг выделяется тепла:

$$Q'_H = \frac{3142,8 \cdot 10^3}{78} = 40292,3 \text{ кДж/кг.}$$

Теплоту сгорания 1 м³ паров бензола при нормальных условиях определим, используя следствие из закона Авогадро. При сгорании 1 м³ паров выделяется тепла:

$$Q''_H = \frac{3142,8 \cdot 10^3}{22,4} = 140303,6 \text{ кДж/м}^3.$$

Пример 9. Определить по формуле Менделеева низшую теплоту горения 4-метил-5-β-оксиэтилтиазола ($\text{C}_6\text{H}_9\text{ONS}$).

Решение.

Так как необходимо определить низшую теплоту горения, величину $\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^0$ выбираем для газообразной воды.

Определим весовой состав вещества:

$$\mu = 12 \times 6 + 1 \times 9 + 16 \times 1 + 14 \times 1 + 32 \times 1 = 143 \text{ у.е. (100\%).}$$

Откуда

$$C = \frac{12 \times 6 \times 100}{143} = 50,3 \%,$$

$$H = \frac{1 \times 9 \times 100}{143} = 6,3 \%,$$

$$O = \frac{1 \times 16 \times 100}{143} = 11,2 \%,$$

$$N = \frac{1 \times 14 \times 100}{143} = 9,8 \%,$$

$$S = \frac{1 \times 32 \times 100}{143} = 22,4 \%.$$

Определим низшую теплоту горения вещества:

$$Q_H = 339,4 \times 50,3 + 1257 \times 6,3 - 108,9(11,2 + 9,8 - 22,4) - \\ - 25,1(9 \times 6,3 + 0) = 23720,2, \text{ кДж/кг.}$$

Пример 10. Определить низшую теплоту сгорания в кДж/м³ и кДж/кмоль газовой смеси, имеющей следующий состав: CO = 20%, H₂ = 10%, CH₄ = 20%, C₂H₆ = 20%, CO₂ = 10%, N₂ = 10%, O₂ = 10%. Условия — нормальные.

Решение.

Из справочника определяем теплоту сгорания компонентов:

$$Q_{HCO} = 12650 \text{ кДж/м}^3,$$

$$Q_{HH_2} = 10770 \text{ кДж/м}^3,$$

$$Q_{HCH_4} = 35820 \text{ кДж/м}^3,$$

$$Q_{HC_2H_6} = 63690 \text{ кДж/м}^3.$$

Теплоту сгорания 1 кмоль газовой смеси найдем, используя следствие из закона Авогадро: 1 кмоль газа при нормальных условиях занимает объем 22,4 м³:

$$Q_H = 23509 \times 22,4 = 526,6 \cdot 10^3 \text{ кДж/кмоль.}$$

4.2 Температура горения

Пример 11. Определить действительную температуру горения древесины состава: $C = 45\%$, $H = 5\%$, $O = 35\%$, $N = 1\%$, $S = 0\%$, $W = 10\%$, $A = 4\%$, если горение протекало при $\alpha_B = 1,4$. Недожог составил 5% Q_H , а потери тепла излучением равнялись 10% Q_H . Начальные условия — нормальные ($Q_{ИСХ} = 0$).

Решение.

Определим количество теплоты, затраченное на нагрев продуктов горения:

$$Q_{П.Г} = Q_H + Q_{ИСХ} - Q_{НЕДОЖ} - Q_{ПОСТ} = 0,85Q_H$$

По формуле Менделеева найдем низшую теплоту горения древесины:

$$Q_H = 339,4 \times 45 + 1257 \times 5 - 108,9(1 + 35 - 0) - 25,1(9 - 5 - 10) = 16257 \text{ , кДж/кг;}$$

$$Q_{П.Г} = 0,85 \times 16257 = 13819 \text{ кДж.}$$

Таким образом, на нагрев продуктов горения 1 кг древесины будет затрачиваться 13 819 кДж тепла.

Определим объем и состав продуктов горения 1 кг древесины:

$$V_{CO_2} = 1,86 \frac{C}{100}; \quad V_{H_2O} = 11,2 \frac{H}{100}; \quad V_{SO_2} = 0,7 \frac{S}{100};$$

$$V_{N_2} = [7C + 21H + 0,8N + 2,63(S - O)]/100$$

ИЛИ

$$V_{N_2} = \frac{0,76V_B^0 + 0,8N}{100};$$

где C, H, S, N — процентное содержание элементов в смеси.

Подставляя их значения, получаем:

$$V_{CO_2} = \frac{1,86 \times 45}{100} = 0,84 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$V_{H_2O} = \frac{11,2 \times 5}{100} + \frac{1,24 \times 10}{100} = 0,68 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$V_{N_2} = [7 \times 45 + 21 \times 5 + 0,8 \times 1 + 2,63(0 - 35)]/100 = 3,28 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$\Delta V_B = V_B(\alpha_B - 1) \text{ — избыток воздуха.}$$

$$\Delta V_B = 0,267 \left(\frac{C}{3} + H + \frac{S - O}{8} \right) (\alpha_B - 1), \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$\Delta V_B = 0,267 \left(\frac{45}{3} + 5 + \frac{0 - 35}{8} \right) (1,4 - 1) = 1,66 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$V_{п.г} = 0,84 + 0,68 + 3,28 + 1,66 = 6,46 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

При нормальных условиях продукты горения 1 кг древесины будут состоять из: 0,84 м³ CO₂; 0,68 м³ паров H₂O; 3,28 м³ N₂ и 1,66 м³ воздуха. Общий объем продуктов горения составит 6,46 м³ на 1 кг древесины.

Найдем температуру горения. Для этого определим среднее теплосодержание единицы объема продуктов горения:

$$\Delta H_{cp} = \frac{Q_{п.г}}{V_{п.г}} = \frac{13819}{6,49} = 2129,3 \text{ кДж/м}^3.$$

Это значит, что в каждом 1 м³ продуктов горения при температуре горения будет содержаться 2129,3 кДж тепла. Учитывая, что на $\frac{3,28 + 1,66 \times 0,79}{6,49} 100 = 71,2\%$ продукты горения состоят из азота, то по таблице П5 приложения находим, при какой температуре удельное теплосодержание азота соответствует найденной величине (2129,3 кДж/м³). Видим, что эта температура находится между [(1400 - 1500) + 273] К. Принимая во внимание, что в состав продуктов горения входят CO₂ и H₂O, которые обладают таким теплосодержанием при бо-

лее низких температурах, задаемся температурой $(1300 + 273)$ К и определяем для нее суммарное теплосодержание продуктов горения:

$$Q_{ПГ} = \sum \Delta H_{ПГi} \cdot V_{ПГ} = 1861,2 \times 3,28 + 1887,5 \times 1,66 + 2979,1 \times 0,84 + \\ + 2345,5 \times 0,68 = 13374,6 \text{ кДж.}$$

где величины $\Delta H_{ПГ}$ определены по таблице ПЗ приложения.

Так как теплосодержание продуктов горения при $T=1573\text{К}$ ниже $Q_{ПГ}=13819$ кДж, то $T_{Г} > 1573\text{К}$.

Задаемся $T=(1400+273)$ К и вновь определяем теплосодержание продуктов горения при 1673 К:

$$Q_{ПГ} = 2018,8 \times 3,28 + 2035,5 \times 1,66 + 3241,4 \times 0,84 + 2560,9 \times 0,68 = \\ 14525 \text{ кДж.}$$

Так как теплосодержание продуктов горения при $T = 1673$ К выше $Q_{ПГ}$, $T_{Г} < 1673$ К.

Таким образом, температура горения находится в интервале $1573 — 1673$ К. Точное значение температуры горения найдем методом интерполяции, считая, что в этом интервале температур теплосодержание продуктов горения линейно зависит от температуры:

$$T_{Г} = 1573 + \frac{(1673-1573)(13819-13374)}{14525,3-13374} = 1611,8 \text{ К.}$$

Методика определения температуры горения других классов веществ аналогична. В случае горения индивидуальных химических соединений при определении $V_{ПГ}$ удобнее пользоваться единицей измерения кмоль/кмоль, а при нахождении $Q_{ПГ}$ и $\Delta H_{СР}$ — единица измерения кДж/кмоль. В этом случае в расчете необходимо использовать данные таблицы ПЗ приложения.

5 Расчет избыточного давления при взрыве газопаровоздушных, пылевоздушных, газовоздушных смесей и конденсированных взрывчатых веществ

5.1 Взрывы газовоздушных смесей в открытом пространстве

Пример 12. Произошел взрыв облака ГВС, образованного при разрушении резервуара с 10^6 кг сжиженного пропана. Определить давление воздушной ударной волны на расстоянии $r = 200$ м.

Решение.

Определяем радиус зоны детонации по формуле (2.3):

$$r_0 \approx 14,53 \sqrt{\frac{m_{\Gamma} \cdot k}{\mu_{\Gamma} \cdot C_{СТХ}}} = 14,53 \sqrt{\frac{10^6 \cdot 0,6}{44 \times 4,03}} = 157 \text{ м.}$$

Определяем отношение расстояния от центра взрыва до рассматриваемого здания к радиусу детонационной волны:

$$\frac{r}{r_0} = \frac{200}{157} = 1,2.$$

При $\frac{r}{r_0} = \frac{200}{157} = 1,2$ по таблице приложения П7 путем интерполяции получаем $\Delta P_{\Phi} = 400$ кПа. Полученные параметры воздушной ударной волны анализируются и наносятся на схему возможной обстановки при возникновении ЧС.

5.2 Взрывы пылевоздушных смесей в производственных помещениях

Пример 13. В цехе по переработке полиэтилена при разгерметизации технологического блока возможно поступление пыли в помещение.

Исходные данные: $V_{\Pi} = 4800 \text{ м}^3$, $\varphi_{\text{нкр}} = 45 \text{ г/м}^3$, $Q = 47,1 \text{ МДж/кг}$. Определить давление воздушной ударной волны на расстоянии 30 м от контура помещения при разрушении его ограждающих конструкций.

Решение.

Определяем стехиометрическую концентрацию пыли:

$$C_{СТХ} = 3\varphi_{НКПР} = 3 \times 45 = 135 \text{ г/м}^3.$$

Определяем расчетную массу пыли:

$$m = \frac{V_0 C_{СТХ}}{1000} = \frac{0,8 \times 4800 \times 135}{1000} = 518,4 \text{ кг.}$$

Определяем энергию взрыва:

$$Q = m \cdot U = 518,4 \times 47,1 = 24,4 \cdot 10^6 \text{ кДж.}$$

Определяем радиус детонационного действия:

$$r_0 = \frac{1}{24} \sqrt[3]{Q} = \frac{1}{24} \sqrt[3]{24,4 \cdot 10^6} = 12 \text{ м.}$$

Определяем отношение расстояния от центра взрыва до рассматриваемого здания к радиусу детонационной волны:

$$\frac{r}{r_0} = \frac{30+12}{12} = 3,5.$$

При $\frac{r}{r_0} = 3,5$ по таблице приложения П7 путем интерполяции получаем $\Delta P_{\Phi} = 65 \text{ кПа}$.

5.3 Взрывы газопаровоздушных смесей в помещениях

Пример 14. Произошел взрыв этилено-воздушной смеси при разгерметизации технологического блока внутри производственного помещения $V_{\text{пом}} = 1296 \text{ м}^3$; $\rho_{СТХ} = 1,285 \text{ кг/м}^3$; $U = 3,01 \text{ МДж/кг}$; $C_{СТХ} = 6,54\%$. Определить давление воздушной ударной волны на расстоянии 30 м от контура помещения при разрушении его ограждающих конструкций.

Решение.

Определяем энергию взрыва по формуле (2.9):

$$Q = \frac{6,54 \times 0,8 \times 1296 \times 1,285 \times 3,01 \times 1000}{100} = 2,023 \cdot 10^5 \text{ кДж.}$$

Определяем радиус детонационного действия по формуле (2.6):

$$r_0 = \frac{1}{24} \sqrt[3]{2,023 \cdot 10^5} = 2,5 \text{ м.}$$

Определяем отношение расстояния от центра взрыва до рассматриваемого здания к радиусу детонационной волны:

$$\frac{r}{r_0} = \frac{39+2,5}{2,5} = 13$$

При $r/r_0 = 13$ по таблице приложения П7 путем интерполяции получаем $\Delta P_\Phi = 9,375$ кПа.

5.4 Взрывы конденсированных взрывчатых веществ

Пример 15. Определить значение ΔP_Φ на расстоянии 20 м при взрыве тротила массой 100 кг. Подстилающая поверхность - металл.

Решение.

Определяем приведенный радиус по формуле (2.10):

$$R' = \frac{R}{\sqrt[3]{2\eta m K_{\Phi\Phi}}} = \frac{20}{\sqrt[3]{2 \times 1 \times 100 \times 1}} = 3,1 \text{ м/кг.}$$

Так как при $R' = 3,1 < 6,2$, то ΔP_Φ определяем по формуле (2.11):

$$\Delta P_\Phi = \frac{700}{3(\sqrt{1+R'^3}-1)} = \frac{700}{3(\sqrt{1+3,4^3}-1)} = 43 \text{ кПа.}$$

5.5 Взрывы на магистральных газопроводах

Пример 16. Определить границу r зоны возможных разрушений в величину избыточного давления воздушной ударной волны. Исходные данные: $d = 0,5$ м; $P_\Gamma = 1,9$ МПа; $t = 40^\circ\text{C}$; $W_{\text{BT}} = 1$ м/с.

Решение.

Определяем удельный объем транспортируемого газа по формуле (2.16):

$$V_\Gamma = R_0 \frac{T}{P_\Gamma} = 486 \frac{(274+40)}{1,9 \cdot 10^6} = 0,08 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Определяем массовый секундный расход газа по формуле (2.15):

$$M_{\Gamma} = \psi S \mu \sqrt{\frac{P_{\Gamma}}{V_{\Gamma}}} = 0,7 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4} \cdot 0,8 \cdot \sqrt{\frac{1,9 \cdot 10^6}{0,08}} = 536 \text{ кг/с.}$$

Определяем радиус детонационной волны по формуле (2.14):

$$r_0 = 12,5 \sqrt{\frac{M_{\Gamma}}{W_{BT}}} = 12,5 \sqrt{\frac{536}{1}} = 289 \text{ м.}$$

Определяем границу зоны возможных разрушений при $\Delta P_{\Phi} = 50$ кПа. Из таблицы приложения П7 $r/r_0 = 4$, значит

$$r = 4r_0 = 289 \times 4 = 1156 \text{ м.}$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Определить объем воздуха, необходимого для полного сгорания вещества при заданной температуре T и давлении P в следующих физических величинах: кмоль/кмоль, $\text{м}^3/\text{м}^3$, $\text{м}^3/\text{кг}$, номера вариантов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для решения задач

№ варианта	Вещество	T , К	P , Па
1	Этан	300	80000
2	Ацетилен	270	9500
3	Пропан	300	105000
4	Бутан	300	100000
5	Пентан	290	110000
6	Гексан	270	80000
7	Гептан	270	80000
8	Октан	280	90000
10	Толуол	300	115000
11	Метан	310	120000
12	Этилен	270	125000
13	Ацетилен	280	85000
14	Этиловый спирт	290	95000
15	Бутилен	300	90000
16	Пентен	310	100000
17	Гексен	295	115000
18	Бензол	285	110000
19	Гексен	295	115000
20	Гентилен	295	120000
21	Октен	315	125000

Задача 2. В помещении объемом V в результате сгорания органики, состоящей из C , H , O , N , S , W (влага), A (зола), концентрация кислорода снизилась на χ %. Определить количество сгоревшей органики при заданной температуре T и давлении P . Исходные данные для решения задач приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Исходные данные для решения задач

№ вар.	V , m^3	C , %	H , %	O , %	N , %	S , %	W , %	A , %	χ , %	T , К	P , Па
1	200	40	3	15	15	-	17	10	6	300	85 000
2	400	50	3	10	10	-	17	10	10	290	95 000
3	150	60	5	3	10	2	15	5	1	300	105 000
4	50	70	5	10	5	1	5	4	8	300	105 000
5	300	40	10	10	15	5	15	5	9	290	110 000
6	500	45	6	15	10	4	7	13	10	270	80 000
7	400	55	4	10	15	6	8	2	11	270	80 000
8	550	65	15	6	4	-	9	1	12	280	90 000
9	650	44	5	10	15	6	10	10	13	290	105 000
10	850	35	10	14	15	5	11	10	14	300	115 000
11	350	38	12	13	10	6	12	9	15	310	120000
12	450	68	2	10	5	3	3	9	16	270	125000
13	150	57	3	6	8	2	14	10	6	280	85000
14	700	47	13	5	2	8	15	10	7	290	95000
15	800	39	1	15	3	17	16	19	8	300	90000
16	900	59	4	5	3	7	17	5	9	310	100000
17	100	46	4	12	7	8	13	10	10	275	105000
18	115	56	4	10	7	3	12	8	11	285	110000
19	850	66	3	5	9	2	10	5	12	295	115000
20	950	76	3	5	4	2	5	5	13	295	120000
21	115	48	2	8	18	2	12	10	14	315	125000

Задача 3. Определить объем и состав продуктов горения вещества в кмоль/кмоль и m^3/kg при заданном коэффициенте избытка воздуха α , температуре продуктов горения $T_{п.г}$ и давлении P . Исходные данные приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Исходные данные для расчетов

№ вар.	Вещество	α	$T_{п.г}$, К	P , Па
1	2	3	4	5
1	Октан	1,3	1600	100000
2	Пентан	1,4	1500	80 000
3	Пропан	1,2	1200	80000
4	Бутан	1,25	1250	85000

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5
5	Пентан	1,35	1300	90000
6	Гексан	1,45	1350	95000
7	Гептан	1,5	1400	100000
8	Октан	1,55	1450	105000
9	Бензол	1,4	1500	110000
10	Толуол	1,25	1550	110 000
11	Метан	1,3	1600	75000
12	Этилен	1,35	1650	80000
13	Ацетилен	1,4	1250	80000
14	Этиловый спирт	1,45	1250	80000
15	Бутилен	1,5	1300	95000
16	Пентен	1,55	1350	100000
17	Гексен	1,6	1400	105000
18	Бензол	1,2	1450	105000
19	Гексен	1,25	1500	115000
20	Геитилен	1,3	1550	120000
21	Октен	1,35	1600	125000

Задача 4. Определить состав и количество, м^3 , продуктов горения веществ состава C, H, S, N, O, W, A при заданной температуре продуктов горения $T_{п.г.}$, давлении P и коэффициента избытка воздуха α . Исходные данные приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Исходные данные для расчетов

№ вар.	$C,$ %	$H,$ %	$S,$ %	$N,$ %	$O,$ %	$W,$ %	$A,$ %	α	$T_{п.г.}$ K	$P,$ Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	75	10	1	4	2	8	-	1,3	1200	150000
2	65	10	10	5	2	8	-	1,4	1100	140000
3	60	5	2	10	3	15	5	1,2	1200	80000
4	70	5	1	5	10	5	4	1,25	1250	85000
5	40	10	5	5	10	15	5	1,35	1300	90000
6	45	6	4	10	15	7	13	1,45	1350	95000
7	55	4	6	15	10	8	2	1,5	1400	100000
8	65	15	-	4	6	9	1	1,55	1450	105000
9	44	5	6	15	10	10	10	1,4	1500	110000
10	35	1	5	15	14	10	10	1,2	1550	70 000

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
11	38	12	6	10	13	9	9	1,3	1600	75000
12	68	2	3	5	10	9	9	1,35	1650	80000
13	57	3	2	8	6	10	10	1,4	1250	80000
14	47	13	8	2	5	10	10	1,45	1250	90000
15	39	1	17	3	15	9	9	1,5	1300	95000
16	59	4	7	3	5	5	5	1,55	1350	100000
17	46	4	8	7	12	10	10	1,6	1400	105000
18	56	4	3	7	10	8	8	1,2	1450	105000
19	66	3	2	9	5	5	5	1,25	1500	115000
20	76	3	0	4	5	5	5	1,3	1550	120000

Задача 5. Определить объем и состав продуктов горения воздушной смеси объемом 2 м^3 того же состава, что в задаче 4. Исходные данные приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Исходные данные для расчетов

№ вар.	Концентрация вещества, %							
					CO	N ₂	CO ₂	O ₂
1	C ₂ H ₆	40	C ₂ H ₆	20	10	10	10	10
2	C ₂ H ₂	40	C ₂ H ₆	20	20	5	5	10
3	C ₂ H ₂	50	CH ₄	15	15	5	10	5
4	C ₃ H ₈	50	C ₂ H ₆	25	10	5	5	5
5	C ₅ H ₁₅	40	C ₄ H ₁₀	30	5	10	5	10
6	C ₆ H ₆	50	C ₅ H ₁₂	25	4	16	3	2
7	C ₇ H ₁₆	45	C ₆ H ₁₄	30	14	6	3	2
8	C ₈ H ₁₈	45	C ₆ H ₆	25	10	5	5	10
9	C ₆ H ₆	50	C ₈ H ₁₈	20	15	5	10	5
10	C ₈ H ₁₈	40	C ₆ H ₆	30	4	16	3	2
11	C ₆ H ₆	50	CH ₃ C ₆ H ₅	25	10	5	5	5
12	CH ₃ C ₆ H ₅	45	CH ₄	30	17	3	3	7
13	CH ₄	50	C ₂ H ₄	25	8	12	2	3
14	C ₂ H ₆	40	C ₂ H ₂	30	12	8	2	3
15	C ₂ H ₂	50	C ₂ H ₅ OH	30	16	5	6	4
16	C ₂ H ₅ OH	45	C ₄ H ₈	20	4	16	4	6
17	C ₄ H ₁₈	40	C ₅ H ₁₀	40	10	10	5	-
18	C ₃ H ₁₀	50	C ₂ H ₂	30	10	10	5	10
19	C ₂ H ₁₂	35	C ₂ H ₁₂	25	5	5	10	5
20	C ₆ H ₆	40	C ₆ H ₆	25	10	5	10	5
21	C ₆ H ₁₂	40	C ₂ H ₁₂	35	5	10	10	5

Задача 6-7. Определить концентрационные и температурные пределы воспламенения вещества при атмосферном давлении 101,325 кПа. Исходные данные приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Исходные данные для расчетов

№ варианта	Формула вещества	Название вещества
1	C_3H_6O	Ацетон
2	C_6H_6	Бензол
3	C_8H_{18}	Октан
4	$C_6H_{11}CH_3$	Метилциклогексан
5	CH_3OH	Метанол
6	C_2H_5OH	Этанол
7	C_3H_7OH	Пропанол
8	C_4H_9OH	Бутанол
9	C_3H_7OH	Пропиловый спирт вторичный
10	$(CH_3)_3COH$	Бутиловый спирт
11	$C_5H_{11}CH_3$	Метилпентан
12	C_4H_8O	Диэтиловый эфир
13	$C_4H_8O_2$	Уксусноэтиловый эфир
14	C_8H_{18}	Октан
15	C_6H_{14}	Гексан
16	$C_3H_6O_3$	Глицерин
17	C_2H_5OH	Этанол
18	C_3H_7OH	Пропанол
19	$C_5H_{11}CH_3$	Метилпентан
20	C_6H_5OH	Стирол
21	$C_6H_5CH_3$	Толуол

Задача 11.1. Определить действительную температуру горения вещества. Исходные данные приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Исходные данные для расчетов

Вариант	Вещество	α_B	Недожог Q_H , %	Потери Q_H , %
1	Метан	1,4	7	8
2	Этан	1,45	8	7
3	Бутан	1,43	6	9
4	Пропан	1,42	8	7
5	Пентан	1,4	10	5
6	Гексан	1,38	10	6
7	Гептан	1,36	8	9
8	Гептилен	1,34	5	10
9	Этилен	1,32	6	9
10	Бутилен	1,3	8	7
11	Бензол	1,28	9	6
12	Гексен	1,26	4	11
13	Толуол	1,25	11	4
14	Ацетилен	1,27	10	6
15	Метан	1,29	9	4
16	Этан	1,31	8	7
17	Бутан	1,33	9	6
18	Пропан	1,35	10	4
19	Пентан	1,37	11	4
20	Гексан	1,4	12	3
21	Гептилен	1,43	14	2
22	Этилен	1,46	10	6
23	Бутилен	1,49	9	7
24	Бензол	1,48	8	7
25	Гексен	1,45	7	8

Задача 11.2. Определить действительную температуру горения вещества.

Исходные данные приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Исходные данные для расчетов

Вариант	Состав вещества, %								Недожог Q _н , %	Потери Q _н , %
	C	H	N	S	W	O	A	α _B		
1	61	5	4	7	10	10	3	1,55	5	9
2	59	6	7	8	11	7	4	1,5	3	10
3	60	7	6	6	12	4	5	1,45	4	И
4	58	8	4	6	13	5	6	1,4	2	12
5	57	9	6	5	14	4	7	1,35	3	13
6	56	10	4	6	15	5	6	1,3	4	11
7	55	9	7	3	15	6	5	1,35	5	10
8	54	8	8	4	14	8	4	1,4	6	9
9	53	7	7	6	15	7	5	1,45	7	8
10	52	6	4	10	16	6	6	1,5	8	7
11	51	5	8	8	15	6	7	1,55	7	8
12	50	4	9	8	16	5	8	1,6	6	9
13	49	3	10	8	17	4	9	1,55	5	10
14	48	2	9	8	17	6	10	1,5	4	11
15	47	8	8	6	18	4	9	1,45	3	10
16	49	9	7	7	18	5	8	1,4	2	11
17	45	7	8	8	17	8	7	1,35	3	12
18	44	6	10	9	16	9	6	1,3	4	11
19	43	5	11	11	15	10	5	1,35	5	10
20	42	4	10	10	15	9	9	1,4	6	9
21	41	3	10	12	16	9	9	1,45	7	8
22	40	8	11	6	17	8	10	1,5	8	7
23	61	2	6	6	10	5	10	1,55	7	8
24	62	1	7	7	9	6	8	1,6	6	9
25	58	6	7	5	11	5	8	1,3	5	10

Задача 11.3. Определить действительную температуру горения смеси.

Исходные данные приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Исходные данные для расчетов

Вариант	Состав смеси, %												α_B	Недож, $Q_{H, \%}$	Потери, $Q_{H, \%}$
	C_8H_{18}	C_4H_{10}	C_2H_6	C_6H_{12}	C_6H_6	O_2	N_2	CO_2	H_2	CO	CH_4	C_2H_2			
1		40		35			6	5	4	10			1,6	5	10
2				50	25	5	3	10	2	5			1,55	11	4
3			25			5	3	5	2	10	50		1,6	6	9
4				25	40	10	8	5	2	10			1,25	4	11
5						4	3	3	3	17	30	40	1,35	8	7
6					20	10	10	8	2	10	40		1,45	6	9
7			45		30	2	16	3	0	4			1,2	8	4
8	20				50	5	5	10	5	5			1,4	8	8
9	10	30		20	5	3	2	10	20				1,3	4	11
10	20		40	30		2	3	5					1,4	5	10
11						2	5	3	10	20	40	20	1,5	6	9
12	10	40	20		20	3	2	5					1,4	7	8
13	15	35	25		15	2	5	3					1,3	8	7
14						5	2	3	10	40	25	15	1,5	7	8
15						2	3	5	20	10	20	60	1,4	6	9
16	40	10	10	20	10	5	3	2					1,2	4	11
17	50	10	10	10	10	2	3	5					1,3	5	И
18						5	2	3	10	20	10	50	1,4	6	9
19						3	5	2	10	10	10	60	1,5	7	8
20	60	10	5	10	5	2	3	5					1,6	8	7
21	10	70	5	5		3	2	5					1,2	9	6
22						5	3	2	5	5	70	10	1,3	8	8
23						2	5	3	5	70	5	10	1,4	7	8
24	5	5	10	70		3	2	5					1,5	6	9
25	5		5	10	70	2	3	5					1,4	5	10

2.6 Задачи для самостоятельного решения

Задача 12. Произошел взрыв облака ГВС, образованного при разрушении резервуара с t кг сжиженного газа. Определить давление воздушной ударной волны на расстоянии r . Исходные данные брать из таблицы приложения Пб. Исходные данные приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Исходные данные для расчетов

Вариант	Вещество	Расстояние r, м	m , кг
1	Аммиак	200	10^3
2	Ацетилен	150	10^4
3	Бутан	100	10^6
4	Бутилен	50	10^7
5	Винилхлорид	120	10^5
6	Водород	210	10^4
7	Дивинил	300	10^4
8	Метан	90	10^6
9	Оксид углерода	150	10^6
10	Пропан	120	10^5
11	Пропилен	100	10^4
12	Этан	70	10^6
13	Этилен	170	10^5
14	Метан	160	10^4
15	Оксид углерода	250	10^5
16	Винилхлорид	100	10^6
17	Водород	105	10^6
18	Бутилен	140	10^6
19	Аммиак	115	10^4
20	Ацетилен	135	10^6
21	Бутан	150	10^5
22	Винилхлорид	100	10^4
23	Дивинил	110	10^6
24	Этилен	160	10^6

Задача 13. В цехе по переработке пластмасс при разгерметизации технологического блока возможно поступление пыли в помещение. Определить давление воздушной ударной волны на расстоянии гот контура помещения при разрушении его охлаждающих конструкций. Исходные данные брать из таблицы приложения П8. Исходные данные приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Исходные данные для расчетов.

Вариант	Вещество	Расстояние r, м	$V_{\text{ПОМ}}, \text{м}^3$
1	Полистирол	10	4300
2	Полиэтилен	20	4500
3	Метилцеллюлоза	30	4800
4	Полиоксадиазол	40	5000
5	Пигмент зеленый (краситель)	50	4200
6	Пигмент бордо на полиэтилене	10	4000
7	Нафталин	20	5100
8	Фталиевый ангидрид	30	5200
9	Уротропин	40	5300
10	Адипиновая кислота	50	5400
11	Сера	10	5500
12	Алюминий	20	5600
13	Фталиевый ангидрид	30	5700
14	Пигмент бордо на полиэтилене	40	3999
15	Полистирол	50	3998
16	Полиэтилен	10	3997
17	Метилцеллюлоза	20	3996
18	Полиоксадиазол	30	3995
19	Пигмент зеленый (краситель)	40	3994
20	Пигмент бордо на полиэтилене	50	5800
21	Нафталин	10	5900
23	Уротропин	20	6000
24	Адипиновая кислота	30	6010
25	Сера	40	6020

Задача 14. Произошел взрыв газовой смеси при разгерметизации технологического блока внутри производственного помещения. Определить давление воздушной ударной волны на расстоянии r от контура помещения при разрушении его ограждающих конструкций. Исходные данные брать из таблицы Пб приложения. Исходные данные приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Исходные данные для расчетов

Вариант	Вещество	Расстояние г, м	$V_{\text{ПОМ}}, \text{м}^3$
1	Аммиак	10	1296
2	Ацетилен	20	1200
3	Бутан	30	1500
4	Бутилен	40	1299
5	Винилхлорид	50	1300
6	Водород	10	1320
7	Дивинил	20	1400
8	Метан	30	1500
9	Оксид углерода	40	1298
10	Пропан	50	1340
11	Пропилен	10	1350
12	Этан	20	1445
13	Этилен	30	1299
14	Метан	40	1600
15	Оксид углерода	50	1610
16	Винилхлорид	10	1510
17	Водород	20	1530
18	Бутилен	30	1620
19	Аммиак	40	1295
20	Ацетилен	50	1294
21	Бутан	10	1295
22	Винилхлорид	20	1289
23	Дивинил	30	1290
24	Этилен	40	1293

Задача 15. Определить значение ΔP_{ϕ} на расстоянии r при взрыве конденсированного взрывчатого вещества массой m . Исходные данные приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Исходные данные для расчетов

Вариант	Вещество	Подстилающая поверхность, η	r , м	m , кг
1	Тротил	Металл	10	50
2	Тротил	Бетон	20	80
3	Тротил	Дерево	30	100
4	Тротил	Металл	40	150
5	Тритонал	Бетон	20	70
6	Тритонал	Дерево	40	90
7	Тритонал	Металл	60	120
8	Тритонал	Бетон	80	140
9	Гексоген	Дерево	100	50
10	Гексоген	Металл	150	100
11	Гексоген	Бетон	200	150
12	Гексоген	Дерево	210	200
13	ТЭН	Металл	250	100
14	ТЭН	Бетон	20	150
15	ТЭН	Дерево	30	50
16	Аммонал	Металл	10	30
17	Аммонал	Бетон	20	50
18	Аммонал	Дерево	30	100
19	Порох	Металл	10	10
20	Порох	Бетон	20	30
21	ТНРС	Дерево	30	50
22	ТНРС	Металл	50	100
23	Тетрил	Бетон	20	30
24	Тетрил	Дерево	30	50
25	Тетрил	Металл	50	100

Задача 16. Определить границу зоны возможных разрушений r с величиной критического избыточного давления воздушной ударной волны при $t=40$ °С и $\Delta P_{\phi}= 50$ кПа. Исходные данные приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Исходные данные для расчетов

№ п/п	Диаметр газопровода, м	$P_{Г}$, МПа	W_{BT} , м/с
1	0,15	1,2	0,5
2	0,20	1,3	1
3	0,25	1,4	2
4	0,3	1,5	3
5	0,35	1,6	4
6	0,4	1,7	5
7	0,45	1,8	1
8	0,5	1,9	2
9	0,55	2,0	3
10	0,6	2,1	4
11	0,65	2,2	5
12	0,7	2,3	0,5
13	0,75	2,4	2
14	0,8	1,2	3
15	0,85	1,4	4
16	0,9	1,6	5
17	0,95	1,8	1
18	1,00	2,0	2
19	1,05	2,2	3
20	1,1	2,4	4
21	1,15	1,3	5
22	1,20	1,5	1
23	1,25	1,7	2
24	1,3	1,8	3
25	1,4	1,9	1

Литература

1. Процессы горения / И.М. Абдурагимов и др. М: ВИПТШ МВД СССР, 1984. 236 с.
2. Аппарат для определения температуры вспышки в закрытом тигле ТВЗ – ПХП ГОСТ 6363, 1502519, ФТМ 93. Паспорт. Руководство по эксплуатации. Методика аттестации. М.: ПромХимПрибор, 2005.
3. Баратов А.Н., Пчелинцев В.А. Пожарная безопасность. М.: Изд-во Ассоциация строительных вузов, 2006. 144 с.
4. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справ. изд. в 2 кн. / А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук и др. М.: Химия, 1990.
5. Беляков Г.И. Безопасность жизнедеятельности на производстве (охрана труда): учебник для вузов. СПб.: Изд-во «Лань», 2006. 502 с.
6. Брушлинский Н.Н., Корольченко А.Я. Моделирование пожаров и взрывов. М.: Изд-во «Пожнаука», 2000.
7. Власов Д.А. Взрыв и его последствия. СПб.: Технологический ин-т, 2002. 247 с.
8. Грачев В.А., Терещнев В.В., Поповский Д.В. Газодымозащитная служба: учеб.-метод. пособие. 2-е изд, перераб. и доп. М.: ООО «Изд-во «Пожнаука», 2009. 328 с.
9. Демидов П.Г., Саушев В.С. Горение и свойства горючих веществ. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1975.
10. Лумисте Е.Г. Безопасность жизнедеятельности в примерах и задачах. Брянск: Изд-во Брянская ГСХА, 2010. 535 с.
11. Пожарная безопасность: учебник для студ. учреждений высш. образования / Л.А. Михайлов, В.П. Соломин, О.Н. Русаки др.; под ред. Л.А. Михайлова. 2-е изд. стер. М.: Издательский центр «Академия», 2014. 224 с.
12. Мальцев В.М., Мальцев М.И., Кашпоров Л.Я. Основные характеристики горения. М.: Химия, 1975. 314 с.

13. Правила пожарной безопасности (ППБ 01 – 03). 2-е изд. М.: ИНФРА – М, 2009. 161 с.
14. Правила, инструкции, нормы пожарной безопасности РФ: сб. нормативных документов. Новосибирск: Сиб. универ., 2010. 176 с.
15. Руководство по эксплуатации. Мотопомпа GP – 51 / РСТ АВ73 CHAMPION. Power& Force.
16. Собурь С.В. Пожарная безопасность предприятия. Курс пожарно-технического минимума: справочник. 7-е изд. доп. (с изм.). М.: Спецтехника, 2003. 436 с.
17. Справочник инженера пожарной охраны / под общ. ред. Д.Б. Самойлова. М.: Инфра-Инженерия, 2010. 864 с.
18. Терещнев В.В., Ульянов Н.П., Грачев В.А. Пожарно-техническое вооружение. Устройство и применение. М.: Центр пропаганды, 2007. 324 с.
19. Теория горения и взрыва: учебник и практикум / О.Г. Казаков и др.; под общ. ред. А.В. Тотая, О.Г. Козакова. 2-е изд., перераб и доп. М.: Изд-во Юрайт, 2013. 295 с.
20. Христофоров Е.Н. Сборник примеров и задач по пожарной безопасности: метод. указ. для выполнения практ. занятий. Брянск: Изд-во Брянская ГСХА, 2010. 88 с.
21. Христофоров Е.Н. Расчет сил и средств для тушения пожаров: метод. указ. для выполнения практических занятий. Брянск: Изд-во Брянская ГСХА, 2010. 90 с.
22. Христофоров Е.Н., Сакович Н.Е. Пожарная безопасность: учеб. пособие. Лабораторный практикум. Брянск: Изд-во Брянская ГСХА, 2015. 74 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 1 – Зависимость давления от температуры для некоторых веществ

Вещество	Давление, Па							
	1333,2	2666,4	5332,9	7999,3	13332,3	26664,0	53329,0	101325
	Температура, К							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ацетон	241,9	252,2	263,6	271,0	280,7	295,7	312,5	329,5
Альдегид уксусный	216,2	225,2	235,2	241,6	250,4	263,0	277,9	293,2
Ангидрид уксусный	309,0	325,0	335,1	343,8	355,2	373,0	392,8	412,6
Акриловая кислота	325,0	339,2	348,0	359,1	376,3	395,0	414,0	276,5
Аллило- вый спирт	283,5	294,7	305,4	313,3	323,0	337,5	353,2	369,6
Амиловый спирт	317,9	328,8	244,0	348,5	358,8	375,0	392,8	410,8
Бензило- вый спирт	365,6	378,8	392,8	402,3	414,7	433,0	456,0	477,7
Бензол	261,5	270,4	286,0	288,4	299,1	315,2	333,6	353,1
Бутиловый спирт	303,2	314,5	326,4	333,3	343,1	357,3	373,8	390,5
Бутиловый спирт (вторич- ный)	289,9	300,3	311,1	318,2	327,1	340,9	356,9	372,5
Бутиловый спирт (третич- ный)	278,5	287,3	297,5	304	312,8	325,7	314,0	355,9
Изобу- тиловый спирт	294,7	307,3	317,1	324,7	334,5	348,9	364,4	381
Бромистый этил	225,5	235,2	246,3	253,5	263	287,5	294	311,4
Бутил- бензол	335	349,3	365,4	275,6	389,2	409,4	432,2	456,1
Бутил- формаат	279,1	291,0	304,6	312,8	324,0	340,9	359,2	379,0
Метил- этилкетон	255,3	266,5	279,0	287,0	298,0	314,6	333,0	352,6

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Метил-циклогексан	269,8	281,7	295,0	303,5	315,1	332,6	352,6	373,9
3-метил-2-бутанол	281,3	291,3	302,6	309,2	318,5	332,0	348,6	361,9
Метиловый спирт	256,8	267,0	278,0	285,1	294,2	307,8	322,9	337,7
Оксид этилена	224	233,7	244,6	251,7	261,0	275,1	290,8	307,5
Октан	281,3	304,5	318,1	326,8	338,7	356,6	377,0	398,6
Пропилбензол	316,4	329,8	344,6	354,1	-	386,5	408,7	432,2
Пропиловый спирт (вторичный)	275,4	285,7	296,8	303,5	312,5	326	340,8	355,5
Стирол	303,8	317,6	332,8	424,5	355,0	374,3	395,5	418,2
Сероуглерод	228,3	238,7	250,5	257,7	267,9	283,4	301,0	319,5
Толуол	279,4	291,4	304,8	313,3	324,9	342,5	262,5	383,6
Уксусно-метиловый эфир	243,7	253,9	265,1	272,5	282,4	279,0	313,0	330,8
Уксуснопропиловый эфир	278,4	289,0	301,8	310,0	320,8	337,0	-	374,8
Уксусноэтиловый эфир	259,5	270,0	282,1	289,6	300,0	315,0	332,3	350,1
Этиловый спирт	270,7	281,0	292,0	299,0	307,9	321,4	336,5	351,4
Этилциклопентан	272,9	284,7	298,0	306,4	318,0	335,4	355,3	318,4
Этилбензол	298,9	311,6	325,8	334,8	347,1	365,7	386,8	409,2
Диэтиловый эфир	224,9	234,5	245,2	251,2	261,5	275,2	290,9	307,0

Таблица 2 – Теплота сгорания некоторых веществ

Горючее вещество	Низшая теплота сгорания Q_H Дж/кг	Горючее вещество	Низшая теплота сгорания Q_H кДж/кг
Амилацетат	33533,5	Каучук натуральный	44833,0
Амиловый спирт	39046,6	Каучук синтетический	45252,0
Анилин	34777,0	Керосин	43157,0
Ацетилен	56000,0	Киноплёнка нитроцеллюлозная и триацетатная	15084,0
Бензин	43576,0	Мазут	18779,6
Бензол	40807,0	Масло солярное	41900,0
Битум, бумага, хлопок, х/б ткани	13408,0	Метан	43069,0
Бутан	45800,0	Нефть	35800,0
Бутиловый спирт	36144,9	Полистирол	38967,0
		Полиэтилен	47137,5
Древесина при влажности, %	16500,0 14400,0 12 200,0	Пенополиуретан	24302,0
		Резина	33520,0
		Толуол	42355,4
		Торф влажностью 19%	16613,3
Капролактам	29 749,0	Хлопок	15700,0

Таблица 3 – Основные физические константы некоторых газов

Вид газа	M, г/моль	d, кг/м ³	T, °C	C _{p298} Дж/(моль•К)	Q _H , кДж/моль	ΔH ⁰ ₂₉₈ , кДж/моль
Воздух	28,98	1,00	-192	1	-	0
Аг	39,95	1,38	-185,7	-	-	0
СО	28,01	0,967	-192	29,15	283,2	-110,6
СО ²	44,01	1,529	78,5	37,13	-	-396,9
СН ₄	16,04	0,555	-161,6	35,79	890,95	75
С ₂ Н ₆	30,07	1,049	-88,6	52,7	1560,92	98,4
С ₃ Н ₈	44,097	1,562	-42,1	73,51	2221,52	103,9
<i>n</i> -С ₅ Н ₁₂	58,124	2,091	-0,5	97,78	2880,43	32,4
изо-С ₄ Н ₁₀	58,124	2,064	-11,7	96,82	2873,44	-
<i>n</i> -С ₅ Н ₁₂	72,151	2,674	36,1	122,6	3539,1	116,4
<i>n</i> -С ₆ Н ₁₄	86,178	2,970	68,1	146,7	4197,7	167,2
С ₂ Н ₄	28,054	0,975	-103,7		1411,91	-52,28
С ₂ Н ₂	26,038	0,906	-83,8	43,93	1257,0	-226,75
С ₆ Н ₆	78,114	2,690	80,1	81,67	3282,4	82,83
С ₁₀ Н ₂₂	142	4,90	114,36	243,1	3382,12	-228,98
С ₈ Н ₈	114	3,93	125,8	194,9	5146,6	-208,4
С ₇ Н ₁₄	98	3,38	118,9	126,7	4725,33	-98,37
С ₆ Н ₁₀	82	2,38	83,1	98,32	3736,6	-105,8
С ₆ Н ₁₂	84	2,90	80,9	106,3	4011,5	-123,1
С ₅ Н ₁₀	70	2,42	49,4	82,93	3368,26	-77,24
Н ₂	2,016	0,070	-252,7	28,83	242,2	0
Н ₂ О	18,015	0,594	100,0	33,56		242,2
Н ₂	28,013	0,967	-195,8	29,10		0
НН ₃	17,0		-33,6	35,65		-46,19
Н ₂ С	34	-	-	33,93		-20,15
О ₂	32	1,1	-182	29,36		-20,15

Таблица 4 – Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении

Температура, К	Теплосодержание, кДж/моль					
	O	N ₂	Воздух	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
200	5991,7	5849,3	5866,0	8019,6	6829,7	8505,7
300	9125,8	8819,9	8861,8	12 536,5	10 378,6	13 223,6
400	12 360,5	11 849,3	11 924,7	17 313,1	14 044,9	18 167,8
500	15 678,9	14 945,7	15 058,8	22 303,4	17 828,4	23 275,4
600	19 072	18 104,9	18 255,8	27 473,8	21 733,5	28 533,9
700	1972,9	18 104,9	18 255,8	27 473,8	21 733,5	285 333,9
800	22 521,2	21 331,3	21 524,0	32 795,1	25 772,7	33 876,1
900	26 019,9	24 616,2	24 842,5	38 237,9	29 937,5	39 285,5
1000	29 564,6	27 955,7	28 211,3	43 785,5	34 232,3	44 799,5
1100	33 142,9	31 337,0	31 621,9	49 442,0	38 648,5	50 321,9
1200	40 391,6	38 221,2	38 560,6	60 922,6	47 807,9	61 492,4
1300	44 036,9	41 719,8	42 067,6	66 788,6	52 584,5	67 161,5
1400	47 724,1	45 252,0	45 629,1	72 654,6	57 403,0	72 797,1
1500	51 453,2	48 773,6	49 190,6	78 562,50	62 347,2	78 436,8
1600	55 182,3	52 375,0	52 794,0	84 554,2	67 333,3	84 135,2
1700	58 953,3	55 936,5	56 397,4	90 545,9	72 445,1	89 821,0
1800	62 766,2	59 539,9	60 000,8	96 579,5	77 598,8	95 557,1
1900	66 579,1	63 143,3	63 646,1	102 613,1	82 794,4	101 184,3
2000	70 392,0	66 788,6	67 333,3	108 646,7	88 073,8	107 012,6
2100	72 246,8	70 433,9	71 020,5	114 722,2	93 395,1	112 715,2
2200	78 101,6	74 121,1	74 707,7	120 839,6	98 758,3	118451,3
2300	81 998,3	77 766,4	78 394,9	126 915,1	104 163,4	124220,9
2400	85 936,9	81 453,6	82 124,0	133 032,5	109 631,3	130024,1
2500	89 875,5	85 140,8	85 853,1	139 149,9	115 141,1	135756,0
2600	94 015,2	89 003,9	89 330,8	145 325,9	119 398,2	141513,0
2700	97 857,4	92 653,5	93 105,9	151 481,1	124 782,4	147295,2
2800	101 833,7	96 437,0	96 789,0	157 560,7	130 342,5	152985,3
2900	106 124,2	100 488,7	100 488,7	163 795,5	135 848,2	158813,6
3000	110 113,2	103 828,2	104 205,3	169 946,4	141 161,1	164667,0
2600	4184,9	3953,9	3988,4	6487,47	5387,1	6460,1
2700	4368,9	4135,9	4156,5	6761,8	5639,3	6753,8
2800	4546,1	4304,4	4320,7	7033,3	5897,8	7050,9
2900	4729,2	4469,0	4484,9	7311,1	6459,3	7351,3
3000	4914,9	4634,5	4652,1	7589,7	6425,8	7655,1

Таблица 5 – Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении

Температура, К	Теплосодержание, кДж/м ³					
	O	N ₂	Воздух	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
100	131,8	130,1	130,1	170,1	150,6	181,4
200	267,2	260,9	261,9	357,7	304,7	377,9
300	407,1	393,6	395,4	559,7	463,0	587,0
400	551,4	528,7	532,1	772,6	626,8	824,6
500	669,3	666,6	672,0	925,1	786,2	1034,9
600	850,6	807,8	814,5	1225,6	969,5	1269,6
700	1004,7	951,9	960,3	1463,1	1149,7	1507,5
800	1160,6	1098,2	1108,2	1706,2	1335,3	1746,4
900	1319,0	1246,9	1258,7	1953,8	1527,2	1994,8
1000	1478,6	1398,2	1410,7	2205,2	1724,2	2237,4
1100	1639,5	1551,1	1564,9	2460,4	1926,5	2488,8
1200	1802,1	1705,3	1720,4	2718,5	2133,9	2735,2
1300	1965,1	1861,2	1877,5	2979,1	2345,5	2979,5
1400	2129,8	2010,0	2035,5	3241,4	2560,9	3238,0
1500	2295,7	2176,7	2194,7	3505,7	2781,3	3488,2
1600	2462,4	2335,5	2355,2	3771,4	3004,2	3747,5
1700	2630,5	2495,9	2515,7	4039,6	3231,7	4003,1
1800	2799,7	2656,4	2678,2	4307,3	3461,3	4261,2
1900	2969,4	2818,2	2840,4	4579,7	3693,5	4529,8
2000	3140,8	2979,9	3004,2	4847,8	3928,5	4667,6
2100	3311,7	3142,9	3167,6	5118,2	4166,1	5059,4
2200	3497,8	3306,3	3332,3	5392,5	4405,8	5337,2
2300	3659,1	3469,3	3497,4	5660,7	4667,1	5608,7
2400	3843,3	3633,1	3663,3	5933,0	4890,9	5892,8
2500	4009,8	3797,4	3828,8	6209,60	5136,5	6169,8
2600	4184,9	3953,9	3988,4	6487,47	5387,1	6460,1
2700	4368,9	4135,9	4156,5	6761,8	5639,3	6753,8
2800	4546,1	4304,4	4320,7	7033,3	5897,8	7050,9
2900	4729,2	4469,0	4484,9	7311,1	6459,3	7351,3
3000	4914,9	4634,5	4652,1	589,7	6425,8	7655,1

Таблица 6 – Характеристика газопаровоздушных смесей

Вещество, характеризующее смесь	Формула вещества, образующего смесь	Характеристики смеси			
		молярная масса, г/моль	$\rho_{стх}$, кг/м ³	$U_{м.стх}$ МДж/кг	$C_{стх}$, об. %
<i>Газовоздушные смеси</i>					
Аммиак	NH ₃	15	1,180	2,370	19,72
Ацетилен	C ₂ H ₂	26	1,278	3,387	7,75
Бутан	C ₄ H ₁₀	58	1,328	2,776	3,13
Бутилен	C ₄ H ₈	56	1,329	2,892	3,38
Винилхлорид	C ₂ H ₂ Cl	63	1,400	2,483	7,75
Водород	H ₂	2	0,933	3,425	29,59
Дивинил	C ₄ H ₈	54	1,330	2,962	3,68
Метан	CH ₄	16	1,232	2,763	9,45
Оксид углерода	CO	28	1,280	2,930	29,59
Пропан	C ₃ H ₈	44	1,315	2,801	4,03
Пропилен	C ₃ H ₆	42	1,314	2,922	4,46
Этан	C ₂ H ₆	30	1,250	2,797	5,66
Этилен	C ₂ H ₄	28	1,285	3,010	6,54
<i>Паровоздушные смеси</i>					
Ацетон	C ₃ H ₆ O	58	1,210	3,112	4,99
Бензол	C ₆ H ₆	78	1,350	2,937	2,84
Гексан	C ₆ H ₁₄	86	1,340	2,797	2,16
Дихлорэтан	C ₂ H ₄ Cl ₂	99	1,490	2,164	6,54
Диэтиловый эфир	C ₄ H ₈ O	74	1,360	2,840	3,38
Ксилол	C ₆ H ₁₀	106	1,355	2,830	1,96
Метанол	CH ₄ O	32	1,300	2,834	12,30
Пентан	C ₅ H ₁₂	72	1,340	2,797	2,56
Толуол	C ₇ H ₈	92	1,350	2,843	2,23
Циклогексан	C ₆ H ₁₂	84	1,340	2,797	2,28
Этанол	C ₂ H ₆ O	46	1,340	2,804	6,54
Бензин авиаци- онный	-	94	1,350	2,973	2,10

Таблица 7 – Значения ΔP_{Φ}

r/r_0	0-1	1,01	1,04	1,08	1,2	1,4	1,8	2,7
ΔP_{Φ} , кПа	1700	1232	814	568	400	300	200	100
r/r_0	3	4	5	6	8	12	20	-
ΔP_{Φ} , кПа	80	50	40	30	20	10	5	-

Таблица 8 – Показатели взрывных явлений пыли

Вещество	$\phi_{\text{НКПВ}}$	U , МДж/кг
Полистирол	27,5	39,8
Полиэтилен	45,0	47,1
Метилцеллюлоза	30,0	11,8
Полиоксадиазол	18,0	18,0
Пигмент зеленый (краситель)	45,0	42,9
Пигмент бордо на полиэтилене	39,0	42,9
Нафталин	2,5	39,9
Фталиевый ангидрид	12,6	21,0
Уротропин	15,0	28,1
Адипиновая кислота	35,0	19,7
Сера	2,3	8,2
Алюминий	58,0	30,13

Таблица 9 – Значения коэффициента $K_{ЭФФ}$

Вид ВВ	Тротил	Тритонал	Гексоген	ГЭН	Аммонал	Порох	ТНРС	Тетрил
$K_{ЭФФ}$	1	1,53	1,3	1,39	0,99	0,66	0,39	1,15

Таблица 10 - Периодическая система химических элементов Д.И. Менделеева

Период	Ряд	Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т О В													
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII						
I	1	(H)							H ¹ Водород 1,00797	He ² Гелий 4,0026	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>Обозначение элемента</div> <div>Атомный номер</div> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px auto; width: fit-content;"> Li³ Литий 6,939 </div> <div style="text-align: right;">Относительная атомная масса</div>				
II	2	Li ³ Литий 6,939	Be ⁴ Бериллий 9,0122	B ⁵ Бор 10,811	C ⁶ Углерод 12,01115	N ⁷ Азот 14,0067	O ⁸ Кислород 15,9994	F ⁹ Фтор 18,9984	Ne ¹⁰ Неон 20,179						
III	3	Na ¹¹ Натрий 22,9898	Mg ¹² Магний 24,305	Al ¹³ Алюминий 26,9815	Si ¹⁴ Кремний 28,086	P ¹⁵ Фосфор 30,9738	S ¹⁶ Сера 32,064	Cl ¹⁷ Хлор 35,453	Ar ¹⁸ Аргон 39,948						
IV	4	K ¹⁹ Калий 39,102	Ca ²⁰ Кальций 40,08	Sc ²¹ Скандий 44,956	Ti ²² Титан 47,90	V ²³ Ванадий 50,942	Cr ²⁴ Хром 51,996	Mn ²⁵ Марганец 54,9380	Fe ²⁶ Железо 55,847	Co ²⁷ Кобальт 58,9330	Ni ²⁸ Никель 58,71				
	5	Cu ²⁹ Медь 63,546	Zn ³⁰ Цинк 65,37	Ga ³¹ Галлий 69,72	Ge ³² Германий 72,59	As ³³ Мышьяк 74,9216	Se ³⁴ Селен 78,96	Br ³⁵ Бром 79,904	Kr ³⁶ Криптон 83,80						
V	6	Rb ³⁷ Рубидий 85,47	Sr ³⁸ Стронций 87,62	Y ³⁹ Иттрий 88,905	Zr ⁴⁰ Цирконий 91,22	Nb ⁴¹ Ниобий 92,906	Mo ⁴² Молибден 95,94	Tc ⁴³ Технеций [99]	Ru ⁴⁴ Рутений 101,07	Rh ⁴⁵ Родий 102,905	Pd ⁴⁶ Палладий 106,4				
	7	Ag ⁴⁷ Серебро 107,868	Cd ⁴⁸ Кадмий 112,40	In ⁴⁹ Индий 114,82	Sn ⁵⁰ Олово 118,69	Sb ⁵¹ Сурьма 121,75	Te ⁵² Теллур 127,60	I ⁵³ Иод 126,9044	Xe ⁵⁴ Ксенон 131,30						
VI	8	Cs ⁵⁵ Цезий 132,905	Ba ⁵⁶ Барий 137,34	La* ⁵⁷ Лантан 138,91	Hf ⁷² Гафний 178,49	Ta ⁷³ Тантал 180,948	W ⁷⁴ Вольфрам 183,85	Re ⁷⁵ Рений 186,2	Os ⁷⁶ Осмий 190,2	Ir ⁷⁷ Иридий 192,2	Pt ⁷⁸ Платина 195,09				
	9	Au ⁷⁹ Золото 196,967	Hg ⁸⁰ Ртуть 200,59	Tl ⁸¹ Таллий 204,37	Pb ⁸² Свинец 207,19	Bi ⁸³ Висмут 208,980	Po ⁸⁴ Полоний [210]*	At ⁸⁵ Астат [210]	Rn ⁸⁶ Радон [222]						
VII	10	Fr ⁸⁷ Франций [223]	Ra ⁸⁸ Радий [226]	Ac** ⁸⁹ Актиний [227]	Rf ¹⁰⁴ Резерфордий [261]	Db ¹⁰⁵ Дубний [262]	Sg ¹⁰⁶ Сиборгий [263]	Bh ¹⁰⁷ Борий [262]	Hs ¹⁰⁸ Хассий [265]	Mt ¹⁰⁹ Мейтнерий [266]	110				
		Ce ⁵⁸ Церий 140,12	Pr ⁵⁹ Празеодим 140,907	Nd ⁶⁰ Неодим 144,24	Pm ⁶¹ Прометий [147]*	Sm ⁶² Самарий 150,35	Eu ⁶³ Европий 151,96	Gd ⁶⁴ Гадолиний 157,25	Tb ⁶⁵ Тербий 158,924	Dy ⁶⁶ Диспрозий 162,50	Ho ⁶⁷ Гольмий 164,930	Er ⁶⁸ Эрбий 167,26	Tm ⁶⁹ Тулий 168,934	Yb ⁷⁰ Иттербий 173,04	Lu ⁷¹ Лютеций 174,97
		Th ⁹⁰ Торий 232,038	Pa ⁹¹ Протактиний [231]	U ⁹² Уран 238,03	Np ⁹³ Нептуний [237]	Pu ⁹⁴ Плутоний [244]	Am ⁹⁵ Америций [243]	Cm ⁹⁶ Кюрий [247]	Bk ⁹⁷ Берклий [247]	Cf ⁹⁸ Калифорний [252]*	Es ⁹⁹ Эйнштейний [254]	Fm ¹⁰⁰ Фермий [257]	Md ¹⁰¹ Менделевий [257]	No ¹⁰² Нобелий [255]	Lr ¹⁰³ Лоуренсий [256]

Учебное издание

Христофоров Евгений Николаевич
Сакович Наталия Евгениевна
Адылин Иван Петрович

**РАСЧЕТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА**

**Учебное пособие для выполнения курсовой работы
по дисциплине «ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА»**

Редактор Осипова Е.Н.

Подписано к печати 26.09.2023. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Усл. п. л. 4,01. Тираж 25 экз. Изд. №7569.

Издательство Брянского государственного аграрного университета
243365 Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ