

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

А. А. Чернов, В. И. Татаренко

ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве практикума для обучающихся по направлению подготовки
20.03.01 Техносферная безопасность (уровень бакалавриата)

Новосибирск
СГУГиТ
2026

УДК 662.1/.4:536.46 (075)

Ч493

Рецензенты: кандидат технических наук, доцент НГТУ *Е. А. Удальцов*

кандидат экономических наук, доцент, СГУГиТ *С. А. Вдовин*

Чернов, А. А.

Ч493 Теория горения и взрыва : практикум / А. А. Чернов, В. И. Татаренко. – Новосибирск : СГУГиТ, 2026. – 116 с. – Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-907998-67-4

Практикум подготовлен кандидатом физико-математических наук, доцентом СГУГиТ А. А. Черновым и доктором экономических наук, профессором В. И. Татаренко на кафедре техносферной безопасности СГУГиТ.

В практикуме приведены физико-химические основы горения и их связь с вопросами обеспечения пожарной безопасности специалистами по охране труда. Рассмотрены теоретические и практические вопросы применения теории горения и взрыва в системе стандартов безопасности труда в рамках оценки критических условий возникновения и распространения горения в паровоздушных смесях, концентрационных и температурных пределов распространения пламени, показателей взрывопожарной опасности горючих газов, жидкостей и полей, а также влияния на человека и производственные объекты.

Практикум предназначен для обучающихся по направлению подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность (уровень бакалавриата), профиль подготовки «Безопасность жизнедеятельности в техносфере».

Рекомендован к изданию кафедрой техносферной безопасности, Ученым советом Института кадастра и природопользования СГУГиТ.

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

УДК 662.1/.4:536.46 (075)

ISBN 978-5-907998-67-4

© СГУГиТ, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
ТЕРМОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ГОРЕНИИ.....	6
Практическая работа № 1. Химическое уравнение горения.....	6
Практическая работа № 2. Термохимическое значение теплоты горения	13
Практическая работа № 3. Температура горения	19
Практическая работа № 4. Тепловыделение при горении и взрыве	26
КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В ПАРОВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ.....	41
Практическая работа № 5. Показатели пожарной опасности веществ и материалов	41
Практическая работа № 6. Концентрационные и температурные пределы распространения пламени	50
ВЗРЫВОПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ, ЖИДКОСТЕЙ И ПЫЛЕЙ.....	58
Практическая работа № 7. Определение показателей взрывопожарной опасности газов и жидкостей	58
Практическая работа № 8. Расчет критериев взрывопожарной опасности.....	69
Практическая работа № 9. Определение параметров взрывопожарной опасности пыли.....	75
Практическая работа № 10. Расчет параметров волны давления при взрыве резервуара с перегретой жидкостью при воздействии на него очага пожара ...	81
Практическая работа № 11. Расчет опасных факторов воздействия взрыва на человека и здания	88
Библиографический список.....	93
Приложение. Справочные таблицы.....	95

ВВЕДЕНИЕ

Практикум «Теория горения и взрыва» предназначен для обучающихся по направлению подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность. Его цель заключается в приобретении будущими специалистами в области охраны труда навыков применения научных представлений о горении и взрыве для оценки пожарного риска и соответствия требованиям пожаро-взрывобезопасности на предприятии.

Задачи дисциплины:

- изучение условий возникновения и распространения горения в газо- и паровоздушных средах;
- овладение методами расчета объема и состава продуктов горения, теплоты и температуры горения, основных показателей взрывопожарной опасности, опасных факторов воздействия взрыва на человека и здания.

Место дисциплины в профессиональной подготовке выпускника. Дисциплина «Теория горения и взрыва» базируется на общеобразовательных дисциплинах (физика, химия, математика) и является научным фундаментом для общепрофессиональных и специальных дисциплин «Прогнозирование опасных факторов пожара» и «Пожарная безопасность».

Требования к уровню освоения дисциплины. В результате изучения дисциплины обучающиеся должны:

- 1) иметь представление о методах оценок опасных факторов и нормативных документах, предоставляющих исходные данные для расчетов;
- 2) знать:
 - физико-химическую природу явлений горения и взрыва;
 - механизм распространения пламени по поверхности жидкостей и твердых горючих материалов, механизм их выгорания;
 - условия распространения пламени и природу пределов;
 - условия воспламенения, самовозгорания и зажигания;
- 3) уметь:

– рассчитывать объем и состав продуктов горения, теплоту сгорания и температуру горения;

– определять основные показатели пожарной опасности веществ и материалов (концентрационные пределы распространения пламени, температуру вспышки, температуру самовоспламенения и др.);

– проводить анализ изменения параметров горения в зависимости от различных факторов;

4) иметь навыки:

– оценки показателей взрывопожарной опасности газов, жидкостей и пыли;

– расчетов опасных факторов воздействия взрыва на человека и здания.

Организационно-методические указания.

Изучение практической части дисциплины «Теория горения и взрыва» проводится на практических занятиях и самостоятельно. Усвоение материала контролируется контрольными практическими работами и предусматривает аттестационный допуск к экзамену по дисциплине «Теория горения и взрыва».

Задачи практических работ:

1) изучить содержание практической работы;

2) выполнить расчетное задание согласно рекомендациям, изложенным в теоретической части практической работы, используя справочные таблицы и нормативные документы;

3) ответить на теоретические контрольные вопросы;

4) оформить результаты в виде отчета.

Требования к отчету. Пользуясь приведенными в теоретической части практической работы сведениями и нормативно-правовыми документами, выполнить расчетное задание в соответствии текущими требованиями преподавателя. Полученные результаты представить в виде отчета. Материал в отчете должен быть изложен последовательно, четко, ясно и с промежуточными вычислениями. В конце отчета привести ответы на контрольные вопросы. Отчет выполняется в электронном виде и сдается преподавателю через систему ЭИОС. Шрифт текста TimesNewRoman, размер шрифта 14, межстрочный интервал 1,5, абзацный отступ 1 см.

ТЕРМОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ГОРЕНИИ

Практическая работа № 1 ХИМИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ ГОРЕНИЯ

Цель работы: приобрести навык составления химического уравнения горения, определения состава горючей среды и расхода воздуха при горении.

Время выполнения: 2 часа (аудиторная работа).

Задачи работы

1. Ознакомиться с основными понятиями и определениями.
2. Выполнить расчетное задание согласно рекомендациям, изложенным в теоретической части практической работы, используя справочные таблицы и нормативные документы.
3. Письменно ответить на контрольные вопросы.
4. Оформить результаты в виде отчета согласно требованиям.

Перечень обеспечивающих средств: компьютерное и мультимедийное оборудование, установленное в аудитории, нормативно-правовая документация.

Задачи работы

1. Ознакомиться с основными понятиями и определениями.
2. Выполнить расчетное задание согласно рекомендациям, изложенным в теоретической части практической работы, используя справочные таблицы и нормативные документы.
3. Письменно ответить на контрольные вопросы.
4. Оформить результаты в виде отчета согласно требованиям.

Перечень обеспечивающих средств: компьютерное и мультимедийное оборудование, установленное в аудитории, нормативно-правовая документация.

Общие теоретические сведения

Горение – сложное, быстро протекающее химическое превращение, сопровождающееся выделением значительного количества тепла и ярким свечением. В большинстве случаев горение происходит в результате экзотермического окисления углеводородов, способных к горению (горючего), окислителем (кислородом воздуха, хлором, закисью азота и др.). В соответствии с нормативными стандартами при оценке пожаровзрывоопасности все горючие вещества разделены по агрегатному состоянию на газы, жидкости, твердые вещества и горючие пыли.

Наиболее общим свойством горения является способность возникшего очага пламени перемещаться по всей горючей смеси путем передачи тепла или в результате диффузии активных частиц из зоны горения в свежую смесь. В первом случае говорят о тепловом, а во втором – о диффузионном механизме распространения пламени. На практике горение протекает по комбинированному термодиффузионному механизму. В пламени пылевоздушного облака (например, мелкопомолотой муки при разрушении мукомольного агрегата) кроме термодиффузионного механизма распространения имеется процесс передачи тепла с помощью излучения. Инфракрасное излучение от пылесажевых частиц имеет ключевое значение для горения автомобильных покрышек и некоторых других твердых материалов.

Главным условием для начала горения является наличие смеси горючего с окислителем, называемой горючей средой – средой, способной воспламениться при воздействии источника зажигания (федеральный закон № 123-ФЗ, статья 2, ч. 6., статья 49) [1]. Возникает так называемый треугольник потенциально опасных условий возникновения пожара и взрыва. Аналогично декларируется в европейских нормах пожарной безопасности – Директива АТЕХ 94/9/ЕС (рис. 1.1).

При неконтролируемом горении создается ряд опасных факторов, создающих угрозу здоровью и целостности зданий и сооружений. Для обеспечения охраны труда и оценки пожарной безопасности руководствуются федеральным законом «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ (с изменениями на 25 декабря 2023 г.) [1] и национальным стандартом РФ ГОСТ Р 12.3.047–2012

«Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля» [1].

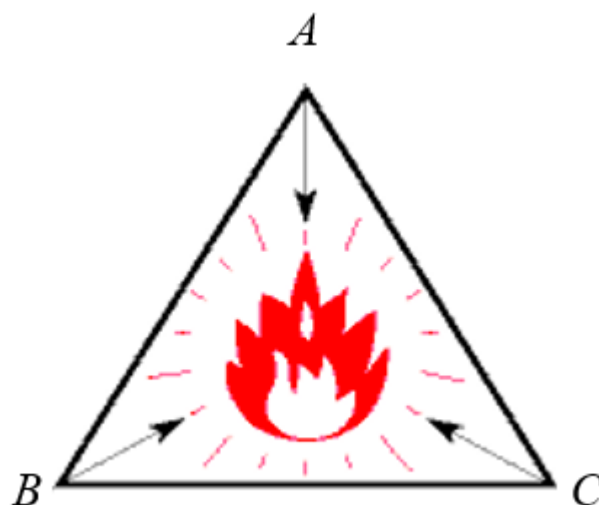
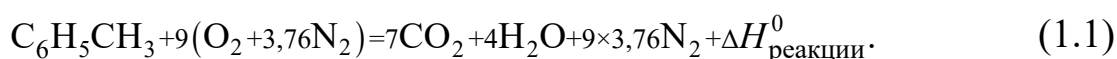


Рис. 1.1. Треугольник потенциально опасных условий возникновения пожара и взрыва: *A* – горючее; *B* – окислитель; *C* – зажигание

Горючая среда – среда, способная воспламениться при воздействии источника зажигания (№ 123–ФЗ, статья 2, ч. 6., статья 49) [1]. Во фронте пламени происходит быстрое образование продуктов сгорания в результате реакции окисления в горючей среде, которую можно представить в виде глобального уравнения химической реакции горения или химического уравнения горения.

При составлении глобального химического уравнения горения учитываются только основные продукты сгорания, которыми являются газообразные вещества: углекислый газ (CO_2), водяной пар (H_2O) и молекулярный азот (N_2). Например, для смеси толуола с воздухом стехиометрическое химическое уравнение горения будет выглядеть следующим образом:



Коэффициент 3,76 при молекулярном азоте слева и справа вычислен из отношения концентрации азота к кислороду в воздухе $[\text{N}_2]/[\text{O}_2] = 79/21$,

т. е. на 1 моль кислорода в воздухе приходится величина, равная значению обыкновенной дроби 79/21 молей азота. Отношение концентрации азота к кислороду в воздухе зависит от высоты территории над уровнем моря. Концентрация веществ обозначается квадратными скобками или другими обозначениями и может выражаться в объемных процентах, мольных долях или молях. При решении практических задач вышеприведенное глобальное химическое уравнение горения выражается в молях. Таким образом, левая часть этого уравнения показывает, что для полного окисления 1 моля толуола потребуется 9 молей воздуха. Это исходная горючая среда, или смесь горючего с воздухом. По умолчанию, цифру один перед формулой вещества в химических уравнениях не ставят.

В правую часть уравнения записывают продукты сгорания и количество тепла в виде энтальпии, образующиеся в результате реакций окисления, и записаны из условий сохранения элементного состава (С, Н, О, N). В данном случае можно утверждать, что из 1 моля толуола при горении в воздухе получается 7 молей углекислого газа CO_2 , 4 моля паров воды H_2O и 33,84 моля молекулярного азота N_2 .

Если в состав исходного вещества входят атомы S, Si, P, Cl, Br, F и J, то продуктами сгорания в нормативных документах считаются соответственно SO_2 , SiO_2 , P_4O_{10} , HCl, HBr, HF и HJ, хотя это и не совсем правильно. Состав продуктов в реальности зависит от условий горения и эквивалентного соотношения.

Согласно закону Авогадро, одинаковые количества газов при одинаковых условиях занимают одинаковый объем. Молярный объем V_m идеального газа рассчитывается по формуле, выводящейся из уравнения состояния идеального газа

$$V_m = RT/p, \quad (1.2)$$

где T – термодинамическая температура (К); p – давление (Па), R – универсальная газовая постоянная $R = 8,31446$ Дж/(моль·К). При нормальных условиях ($T_0 = 273,15$ К (0°C), $P_0 = 101\,325$ Па) молярный объем газов $V_m = 22,41396954$ литров. В соответствии с ГОСТ 2939–63 «Условия определения объема» объем реализуемого горючего газа должен соответствовать следующим стандартным

условиям: температура 20 °С (293,15 °К), давление 760 мм. рт. ст. (101 325 Па), влажность равна 0, моль занимает объем 24,22 литра. За рубежом другие стандартные условия: давление 760 Тор (или мм рт. ст.), температура 298,15 °К или 25 °С – 1 моль (или $N_A = 6,022 \times 10^{23}$ молекул, число Авогадро) и занимает объем 24,467 литра.

Следует осторожно относиться к таким понятиям, как «стандартные условия» и «нормальные условия». Несогласованность этих понятий особенно характерна для нефтяников и газовиков. Также довольно часто в практикумах можно найти задачи, в которых условие содержит величину, представленную в справочнике для стандартных условий, а при решении используются величины, значения которых установлены для нормальных условий. Например, в справочной электронной базе данных NIST (США) энтальпия образования приводится для так называемых стандартных условий с параметрами: 25 °С и 1 атм, а не 20 °С, как принято в российских ГОСТ.

При решении задач следует помнить, что в 1 м³ 1 000 литров, в 1 литре 1 000 см³, в 1 МДж 1000 кДж, молекулярная масса вещества определяет массу 1 моля вещества и измеряется в г/моль или кг/кмоль.

Для вычисления молекулярной массы индивидуального вещества используют простейшую методику суммирования атомных масс каждого элемента, входящего в структурную формулу, используя следующие данные: масса моля атомарного углерода С = 12 г/моль, атомарного водорода Н = 1 г/моль, атомарного кислорода О = 16 г/моль, атомарного азота N = 14 г/моль, атомарной серы S = 32 г/моль, хлора Cl = 35,5 г/моль.

Задание

В соответствии с вариантом выбрать вещество и определить объем воздуха, необходимый для горения индивидуальных веществ для стандартных условий 20 и давлении 760 мм рт. ст., размерность величин [м³/кг]:

- | | |
|---------------------|----------------------|
| 1) гептан; | 14) бутиловый спирт; |
| 2) декан; | 15) окись этилена; |
| 3) 1, 4-диоксан; | 16) изопропилбензол; |
| 4) тетрагидрофуран; | 17) диэтиловый эфир; |
| 5) циклопропан; | 18) этилацетат; |

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 6) гексан; | 19) амилацетат; |
| 7) бензол; | 20) анилин; |
| 8) толуол; | 21) метилацетат; |
| 9) м-ксилол; | 22) циклогексан; |
| 10) о-ксилол; | 23) метиловый спирт; |
| 11) изобутан; | 24) метилциклогексан; |
| 12) этиловый спирт; | 25) этилциклопентан; |
| 13) пропиловый спирт; | 26) амиловый спирт. |

Требования к отчету

Выполнить задание в соответствии с технологией выполнения работы. Полученные результаты представить в виде отчета. Шрифт текста Times New Roman, размер шрифта 14, межстрочный интервал 1,5, абзацный отступ 1 см.

Технология выполнения работы

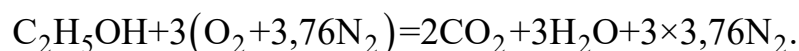
1. Изучить содержание раздела «Общие сведения».

2. В соответствии с вариантом выбрать вещество и определить объем воздуха V_0 , необходимый для горения индивидуальных веществ для стандартных условий 20° и давления 760 мм рт. ст., размерность величин $[м^3/кг]$.

3. Использовать данные из табл. П.1 приложения.

Пример. Вариант 12 – этиловый спирт.

Решение. Записываем уравнение реакции горения этилового спирта, как в формуле (1.1):



Это уравнение позволяет получить теоретически необходимый объем воздуха несколькими способами.

В условиях задачи требуется посчитать на 1 кг. Определим молекулярную массу этилового спирта:

$$M(C_2H_5OH) = 12 \cdot 2 + 5 + 16 + 1 = 46 \text{ г/моль, или } 46 \text{ кг/кмоль.}$$

Составляем пропорцию:

1 моль (или 46 г) – $3 \cdot (1 + 3,76) = 14,28$ моля воздуха;

1 кг (или 1 000 гр) – X молей;

$$X = (14,28 \cdot 1\,000) / 46 = 310 \text{ моля, или } 0,31 \text{ кмоля.}$$

Для стандартных условий 1 моль занимает 24,22 литра, а 1 кмоль в 1 000 раз больше, т. е. $24,22 \text{ м}^3$. Таким образом, объем воздуха, необходимый для горения спирта, равен

$$V_0 = 310 [\text{моля воздуха}] \cdot 24,22 [\text{л}] = 7519 [\text{л}]$$

или

$$V_0 = 0,31 \cdot [\text{кмоля воздуха}] \cdot 24,22 [\text{м}^3] = 7,52 [\text{м}^3].$$

Ответ: объем воздуха, необходимый для горения этилового спирта, равен $7,46 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Контрольные вопросы

1. Какой основной химический процесс заключен в явлении горения?
2. Дайте определение понятию «горючая среда». В каком нормативном документе дано это определение?
3. Что такое треугольник потенциально опасных условий? В каком ФЗ это определено?
4. Как составляется глобальное химическое уравнение горения?
5. Перечислите основные продукты горения.
6. Чему равно отношение концентрации азота к кислороду в воздухе и от чего зависит?
7. Что такое 1 моль вещества, чему он равен в объемных и массовых единицах?
8. Что такое стандартные условия и нормальные условия?
9. Какой закон сохранения используют при составлении химического уравнения горения?

Практическая работа № 2

ТЕРМОХИМИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ТЕПЛОТЫ ГОРЕНИЯ

Цель работы: приобрести навык вычисления термодинамической теплоты сгорания.

Время выполнения: 4 часа (2 часа – аудиторная работа, 2 часа – самостоятельная).

Задачи работы

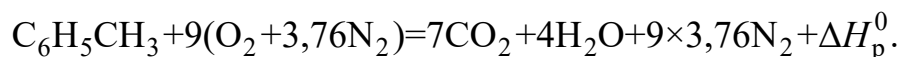
1. Ознакомиться с основными понятиями и определениями.
2. Выполнить расчетное задание согласно рекомендациям, изложенным в теоретической части практической работы, используя справочные таблицы и нормативные документы.
3. Письменно ответить на контрольные вопросы.
4. Оформить результаты в виде отчета согласно требованиям.

Перечень обеспечивающих средств: компьютерное и мультимедийное оборудование, установленное в аудитории, нормативно-правовая документация.

Общие теоретические сведения

Теплота сгорания имеет важное значение для оценки: пределов воспламенения, группы горючести, температуры горения, удельной теплоты пожара и в других случаях.

Быстрое выделение тепла во фронте пламени происходит в результате реакции окисления, которую можно представить в виде глобального уравнения химической реакции горения или химического уравнения горения. Например, для горючей смеси толуола с воздухом химическое уравнение горения будет выглядеть следующим образом:



Реакции горения всегда экзотермические, соответственно, изменение энтальпии в результате протекания реакции горения $\Delta H^0_{\text{реакции}}$ или теплота горения всегда положительная и может быть оценена с помощью закона Гесса: теплота реакции равна разности между суммой теплот образования исходных продуктов и суммой теплот образования конечных продуктов реакции при одном и том же агрегатном состоянии и температуре, но без учета энергии, выделяющейся при конденсации паров воды:

$$\Delta H^0_p = \left(\Delta H^0(\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3) + 9\Delta H^0(\text{O}_2) + 9 \times 3,76\Delta H^0(\text{N}_2) \right) - \left(7\Delta H^0(\text{CO}_2) + 4\Delta H^0(\text{H}_2\text{O}) + 9 \times 3,76\Delta H^0(\text{N}_2) \right).$$

Энтальпии образования простых веществ – $\Delta H^0(\text{O}_2)$ и $\Delta H^0(\text{N}_2)$ – в стандартных условиях при $T = 298,15 \text{ К}$ приняты равными 0, а энтальпии образования других веществ, как правило, хорошо известны:

$$\Delta H^0(\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3) = +50,17 \text{ кДж/моль};$$

$$\Delta H^0(\text{CO}_2) = -393,5 \text{ кДж/моль};$$

$$\Delta H^0(\text{H}_2\text{O}) = -241,8 \text{ кДж/моль}.$$

Соответственно, теплота сгорания толуола (кДж/моль)

$$Q_{\text{гор (толуола)}} = \Delta H^0_p = 50,17 - (7 \times (-393,5) + 4 \times (-241,8)) = +3772.$$

Данная теплота сгорания называется низшей, так как не учитывается теплота, выделяющаяся при конденсации паров воды.

Для определения высшей теплоты горения толуола необходимо к низшей прибавить теплоту конденсации 4 молей паров воды, равной

$$Q_{\text{конд}}(\text{H}_2\text{O}) = 4 \text{ моля} \times 44 \text{ кДж/моль} = 176 \text{ кДж/моль}.$$

Вычисления в данной практической работе проводятся в рамках о предположении адиабатических условий и относятся к разделу «Термохимия». Наиболее точные классические фундаментальные сведения о стандартных теплотах образования индивидуальных веществ можно найти в интернете по адресу: <https://webbook.nist.gov/chemistry/form-ser/>. На рис. 2.1 показан внеш-

ний вид страницы по этому адресу. Необходимо использовать функцию «Gas phase» и вкладку «Gas phase thermochemistry data».

The image shows a screenshot of the NIST Chemistry WebBook search interface. At the top, the NIST logo and 'National Institute of Standards and Technology' are visible, along with the text 'NIST Химия WebBook, SRD 69'. Below the logo is a navigation bar with 'Поиск', 'Данные NIST', and 'Около'. The main heading is 'Поиск данных о видах по химической формуле'. Below this, there are instructions for searching and a list of search criteria. A search box contains the formula 'C4H10'. The search criteria include: 1. Enter the chemical formula (example: C4H10). 2. Select search parameters: 'Exactly match specified isotopes', 'Allow elements not in formula', 'Allow more atoms than specified', and 'Exclude ions'. 3. Select units: 'SI' and 'calories'. 4. Select data types: 'Thermodynamic data' (Gas phase, Condensed phase, Phase change, Reaction, Ion energy, Ion cluster) and 'Other data' (IR spectrum, IR spectrum wavenumber, Mass spectrum, UV/Vis spectrum, Gas chromatography, Oscillation and electronic energy levels, Two-atom constants, Henry's law). 5. A 'Поиск' button is present. At the bottom, there are links for 'Помощь поиска химической формулы' and 'Правила для химических формул', and a note about element symbols and subscripts.

Рис. 2.1. Внешний вид страницы с сайта по поиску энтальпии образования веществ.

Теплоты горения индивидуальных веществ относятся к классу пожароопасных показателей. Их необходимо искать в приложении к нормам пожарной безопасности СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» (приказ МЧС России от 25.03.2009 № 182) [4], ГОСТ 30852.19–2002 «Данные по горючим газам и парам, относящиеся к эксплуатации электрооборудования» и др.

Теплоты образования зависят от температуры и давления, поэтому при использовании данных нужно обращать внимание на то, для каких стандартных условий приведены данные. По международной классификации за стандартные приняты следующие условия: давление 760 Торр (или мм рт.

ст.) или 101,3 кПа, температура 298,15 К или 25 °С. При этих условиях 1 моль (или $N_A = 6,022 \times 10^{23}$ молекул) занимает объем 24,22 литра.

Для определения теплотворной способности сложных твердых и жидких веществ можно использовать 4 метода:

- 1) метод калориметрической бомбы ГОСТ Р 56025–2014;
- 2) метод газожидкостной хромато-масс-спектрометрии;
- 3) метод дифференциальной сканирующей калориметрии;
- 4) метод Менделеева по элементному анализу на содержание углерода, водорода, азота, серы и кислорода.

Задание

Согласно номеру в списке выбрать вещество, найти значение энтальпии образования в табл. П.1 приложения и определить высшую и низшую теплоту горения индивидуальных веществ, размерность величин выразить в [МДж/кг] в стандартных условиях 25 °С и 1 атм:

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1) гептан; | 14) бутиловый спирт; |
| 2) декан; | 15) окись этилена; |
| 3) 1, 4-диоксан; | 16) изопропилбензол; |
| 4) тетрагидрофуран; | 17) диэтиловый эфир; |
| 5) циклопропан; | 18) этилацетат; |
| 6) гексан; | 19) амилацетат; |
| 7) бензол; | 20) анилин; |
| 8) толуол; | 21) метилацетат; |
| 9) м-ксилол; | 22) циклогексан; |
| 10) о-ксилол; | 23) метиловый спирт; |
| 11) изобутан; | 24) метилциклогексан; |
| 12) этиловый спирт; | 25) этилциклопентан; |
| 13) пропиловый спирт; | 26) амиловый спирт. |

Требования к отчету

Выполнить задание в соответствии с технологией выполнения работы. Полученные результаты представить в виде отчета. Шрифт текста Times

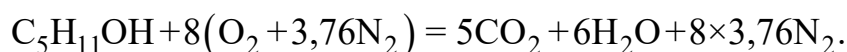
New Roman, размер шрифта 14, межстрочный интервал 1,5, абзацный отступ 1 см.

Технология выполнения работы

1. Изучить содержание раздела «Общие сведения».
2. Согласно номеру в списке выбрать вещество, найти значение энтальпии образования в табл. П.1 приложения и определить высшую и низшую теплоту горения индивидуальных веществ, размерность величин выразить в [МДж/кг] в стандартных условиях 25 °С и 1 атм.

Пример 2.1. Вещество: амиловый спирт.

Решение. Записываем уравнение реакции горения амилового спирта



Энтальпия образования простых веществ – $\Delta H^0(\text{O}_2)$ и $\Delta H^0(\text{N}_2)$ – в стандартных условиях приняты равными 0. Находим энтальпии образования по таблице в приложении:

$$\Delta H^0(\text{C}_5\text{H}_{11}\text{OH}) = -298 \text{ кДж/моль};$$

$$\Delta H^0(\text{CO}_2) = -393,5 \text{ кДж/моль};$$

$$\Delta H^0(\text{H}_2\text{O}) = -241,8 \text{ кДж/моль}.$$

Соответственно низшая теплота горения равна

$$Q_{\text{н,гор}} = \Delta H^0_{\text{реакции}} = -298 + 5 \cdot 393,5 + 6 \cdot 241,8 = 3120,3 \text{ кДж/моль}.$$

Из уравнения горения амилового спирта видно, что образуется 6 моль паров воды. Следовательно, для определения высшей теплоты горения необходимо к низшей прибавить теплоту конденсации паров воды, равную

$$Q_{\text{конд}}(\text{H}_2\text{O}) = 6 \text{ моль} \cdot 44 \text{ кДж/моль} = 264 \text{ кДж/моль}.$$

$$Q_{\text{в,гор}} = 3120,3 + 264 = 3384,3 \text{ кДж/моль}.$$

Молекулярная масса амилового спирта:

$$M(\text{C}_5\text{H}_{11}\text{OH}) = 12 \cdot 5 + 1 \cdot 11 + 16 + 1 = 88 \text{ гр/моль}.$$

Так как 1 моль весит 88 грамма, то составим пропорцию:

88 гр $C_5H_{11}OH \equiv 1$ моль – 3 120,3 кДж (выделяется тепла при горении);

1 кг = 1 000 гр – X кДж;

$$X = Q_{н,гор} = 3\,120,3 \cdot 1\,000 / 88 = 35\,457 \text{ кДж/кг} \approx 35 \text{ МДж/кг};$$

$$Q_{в,гор} = 3\,384,3 \cdot 1\,000 / 88 = 38 \text{ МДж/кг}.$$

Ответ: $Q_n = 35$ МДж/кг, $Q_v = 38$ МДж/кг.

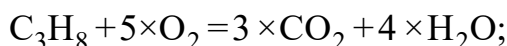
Пример 2.2. Пользуясь законами Гесса, рассчитать низшую теплоту сгорания (МДж/м³) газовой смеси (в объемных процентах): 47 % пропана и 53 % бутана.

Решение. Исходные данные. В 1 м³ смеси горючих газов

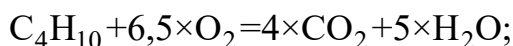
$$C_3H_8 - 47 \% = 470 \text{ л}, \Delta_f H_{gas}^0 (C_3H_8) = -105 \text{ кДж/моль};$$

$$C_4H_{10} - 53 \% = 530 \text{ л}, \Delta_f H_{gas}^0 (C_4H_{10}) = -126 \text{ кДж/моль}.$$

Запишем химическое уравнение горения:



$$Q_r(C_3H_8) = -105 - (3 \cdot (-394) + 4 \cdot (-242)) = 2\,045 \text{ кДж/моль};$$



$$Q_r(C_4H_{10}) = -126 - (4 \cdot (-394) + 5 \cdot (-242)) = 2\,660 \text{ кДж/моль}.$$

При стандартных условиях 25 °С и 1 атм 1 моль газа занимает 24,467 литра:

$$Q_r = \left(2\,045 \cdot \frac{470}{24,467} + 2\,660 \cdot \frac{530}{24,467} \right) \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} = 97 \cdot 10^3 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

Ответ: $Q_r = 97$ МДж/м³.

Контрольные вопросы

1. Что такое экзотермическая и эндотермическая реакции?
2. В чем отличие теплоты образования от теплоты горения?
3. Дайте определение закона Гесса.
4. Как определить теплоту сгорания природных органических веществ и топлив (приведите несколько способов)?
5. В чем отличие высшей теплоты сгорания от низшей?

Практическая работа № 3 ТЕМПЕРАТУРА ГОРЕНИЯ

Цель работы: приобрести навык в оценке температуры продуктов сгорания в пламени.

Время выполнения: 2 часа (аудиторная работа).

Задачи работы

1. Ознакомиться с общими теоретическими сведениями.
2. Выполнить расчетное задание согласно рекомендациям, изложенным в теоретической части практической работы, используя справочные таблицы и нормативные документы.
3. Письменно ответить на контрольные вопросы.
4. Оформить результаты в виде отчета согласно требованиям.

Перечень обеспечивающих средств: компьютерное и мультимедийное оборудование, установленное в аудитории, нормативно-правовая документация.

Общие теоретические сведения

Выделяющееся в зоне горения тепло воспринимается продуктами сгорания, вследствие чего они нагреваются до высокой температуры. Та температура, до которой в процессе горения нагреваются продукты сгорания, называется температурой горения.

Максимальная температура горения различных газов в теплотехнике принимается равной: водород – 2 235 °С; пропан – 2 110 °С; бутан – 2 118 °С; природный газ – 2 000 °С; коксовый газ – 2 090 °С; доменный газ – 1 470 °С.

Различают температуру внутреннего и наружного пожара. Температура внутреннего пожара – это средняя температура дыма в помещении, где происходит пожар. Температура наружного пожара – температура пламени. Максимальное усредненное значение температуры поверхности стены при пожаре

длительностью свыше 1 часа составляет 850 °С с точностью до 3,5 % (ГОСТ 12.3.047–2012) [3].

Тепловой эффект химической реакции зависит от температуры и давления, при этом их значение может изменяться в ходе реакции. Влияние температуры на энтальпию и величину теплового эффекта при постоянном давлении описывается законом Кирхгофа:

$$\Delta H_{T_2} = \Delta H_{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} \Delta C_p(T) dT,$$

где $\Delta C_p(T)$ – разность изобарных теплоемкостей или теплоемкость при постоянном давлении продуктов реакции и исходных веществ с учетом количества молей реагентов. Обычно используются данные, приведены в табл. П.6 приложения.

Упрощенный метод оценки температуры пламени

Для того чтобы оценить степень нагрева продуктов сгорания и давление в замкнутом сосуде в адиабатических условиях без использования специализированных программ и формул Кирхгофа, можно воспользоваться упрощенными формулами:

$$\Delta t_{\text{ад}} = \frac{Q_{\text{н}}}{(VC_p)}, \quad (3.1)$$

$$P_{\text{ад}} = \frac{P_0(T_0 + \Delta t_{\text{ад}})}{T_0}, \quad (3.2)$$

где $\Delta t_{\text{ад}}$ – разница между адиабатической температурой горения и начальной температурой, °С;

$Q_{\text{н}}$ – низшая теплота сгорания газа, кДж/м³;

V – объем продуктов сгорания, м³;

C_p – средняя объемная теплоемкость продуктов сгорания при постоянном давлении в интервале температур $\Delta t_{\text{ад}}$ (°С), равная 1,67 кДж/(м³ град);

T_0 – начальная температура, 273 °К;

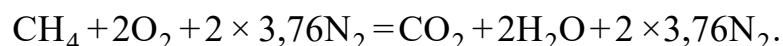
P_0 – начальное давление горючей смеси;

$P_{ад}$ – конечное давление в закрытом сосуде или помещении после полного сгорания смеси.

Пример 3.1. Пользуясь упрощенной формулой (3.1), определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании метана в воздухе при $\varphi = 1$.

Решение.

Составляем уравнение горения метана в воздухе



Определяем низшую теплоту сгорания метана:

$$Q_{н,гор} = \Delta H_{реакции}^0 = -74,6 + 393,5 + 2 \cdot 241,8 = 802,5 \text{ кДж/моль}.$$

При стандартных условиях – +25 °С и 1 атм – 1 моль газа занимает 24,47 л. Составим пропорцию:

$$24,47 \text{ л} - 802,5 \text{ кДж};$$

$$1 \text{ м}^3 = 1000 \text{ л} - Q_n (\text{кДж/м}^3);$$

$$Q_n = 1000 \cdot 802,5 / 24,47 = 32795 \text{ кДж/м}^3.$$

Определяем объемы влажных продуктов сгорания метана на 1 м³ метана:

$$V = \frac{v_{\text{CO}_2} + v_{\text{H}_2\text{O}} + v_{\text{N}_2}}{v_r} = \frac{1 + 2 + 2 \times 3,76}{1} = 10,52 \text{ м}^3.$$

Подставляя эти величины в формулу, получаем

$$\Delta t_{ад} = \frac{Q_n}{(VC_p)} = \frac{32795}{10,52 \cdot 1,67} = 1867 \text{ градусов}.$$

Если начальная температура 20 °С, то максимальная или адиабатическая температура пламени

$$T_{ад} = \Delta t_{ад} + 20(^{\circ}\text{C}) = 1887^{\circ}\text{C}.$$

Ответ: 1887 °С.

При точном вычислении адиабатической температуры и состава продуктов в стехиометрическом пламени метана с помощью современных численных методов температура оказывается равной 1 939 °С, которая больше на 52 градуса. Таким образом, точность этих вычислений для стандартных условий довольно высокая, порядка $\pm 3\%$. Однако на практике применять этот метод все же нужно крайне осторожно.

Пример 3.2. Определить температуру горения метана при $\alpha = 1,5$.

Определяем низшую теплоту сгорания метана:

$$\text{CH}_4 + 2 \times \text{O}_2 + 2 \times 3,76 \text{N}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 2 \times 3,76 \text{N}_2,$$

$$Q_{\text{н,гор}} = \Delta H_{\text{реакции}}^0 = -74,6 + 393,5 + 2 \cdot 241,8 = 802,5 \text{ кДж/моль}.$$

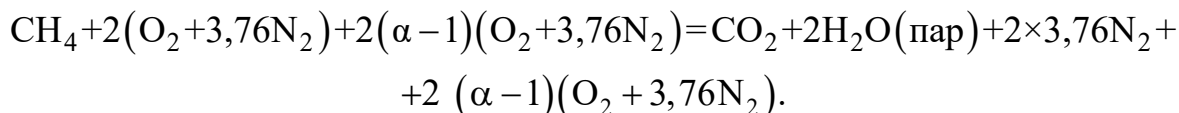
Пропорция:

$$24,47 \text{ л} - 802,5 \text{ кДж};$$

$$1 \text{ м}^3 = 1 000 \text{ л} - Q_{\text{н}} (\text{кДж/м}^3)$$

$$Q_{\text{н}} = 1 000 \cdot 802,5 / 24,47 = 32 795 \text{ кДж/м}^3$$

Определяем объем продуктов сгорания 1 м³ метана:



Общее количество молей получаем суммированием:

$$\nu = 1 + 2 + 2 \cdot 3,76 + 2 \cdot (1,5 - 1) \cdot (1 + 3,76) = 15,29 \text{ молей}.$$

Если при сжигании 1 моля метана мы получаем 15,29 молей, то при сжигании 1 м³ мы также получим 15,29 м³.

Подставляя эти величины в формулу, получаем

$$\Delta t_{\text{max}} = \frac{32 795}{15,29 \cdot 1,67} = 1 284.$$

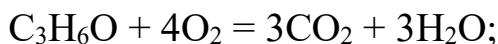
Если начальная температура 20 °С, то максимальная или адиабатическая температура пламени при $\alpha = 1,5$:

$$T_{\text{ад}} = \Delta t_{\text{ад}} + 20(^{\circ}\text{C}) = 1 304^{\circ}\text{C}.$$

Ответ: 1 304 °С.

Пример 3.3. Определить температуру горения ацетона при $\alpha = 1,4$.

Определяем низшую теплоту сгорания ацетона:



$$Q_{\text{H}}(\text{ацетона}) = -218,5 + 3 \cdot 394 + 3 \cdot 242 = 1\,690 \text{ кДж/моль.}$$

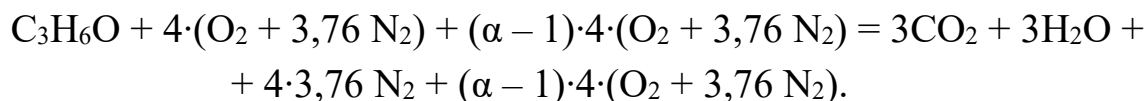
Пропорция:

$$24,47 \text{ л} - 802,5 \text{ кДж};$$

$$1 \text{ м}^3 = 1\,000 \text{ л} - Q_{\text{H}}(\text{кДж/м}^3)$$

$$Q_{\text{H}} = 1\,000 \cdot 1\,690 / 24,47 = 69\,064 \text{ кДж/м}^3.$$

Определяем объем продуктов сгорания 1 м³ ацетона:



Общее количество молей продуктов сгорания получаем суммированием:

$$\nu = 3 + 3 + 4 \cdot 3,76 + 4(1,4 - 1)(1 + 3,76) = 28,656 \text{ молей.}$$

Если при сжигании 1 моля ацетона мы получаем 28,656 молей, то при сжигании 1 м³ мы, соответственно, получим 28,656 м³. Это связано с тем, что моль – объемная величина.

Подставляя эти величины в формулу, получаем

$$\Delta t_{\text{max}} = \frac{69\,064}{28,656 \cdot 1,67} = 1\,443.$$

Если начальная температура 20 °С, то максимальная или адиабатическая температура пламени при $\alpha = 1,4$

$$T_{\text{ад}} = \Delta t_{\text{ад}} + 20(^{\circ}\text{C}) = 1\,463^{\circ}\text{C}.$$

Ответ: 1 463 °С.

Задание

В соответствии со своим номером в списке выбрать вещество и определить температуру пламени при горении индивидуального вещества. Горение происходит при $t = 20^\circ$ и давлении 760 мм рт. ст.:

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1) гептан; | 14) бутиловый спирт; |
| 2) декан; | 15) окись этилена; |
| 3) 1, 4-диоксан; | 16) изопропилбензол; |
| 4) тетрагидрофуран; | 17) диэтиловый эфир; |
| 5) циклопропан; | 18) этилацетат; |
| 6) гексан; | 19) амилацетат; |
| 7) бензол; | 20) анилин; |
| 8) толуол; | 21) метилацетат; |
| 9) м-ксилол; | 22) циклогексан; |
| 10) о-ксилол; | 23) метиловый спирт; |
| 11) изобутан; | 24) метилциклогексан; |
| 12) этиловый спирт; | 25) этилциклопентан; |
| 13) пропиловый спирт; | 26) амиловый спирт. |

Требования к отчету

Выполнить задание в соответствии с технологией выполнения работы. Полученные результаты представить в виде отчета. Шрифт текста Times New Roman, размер шрифта 14, межстрочный интервал 1,5, абзацный отступ 1 см.

Технология выполнения работы

1. Изучить содержание раздела «Общие теоретические сведения».
2. В соответствии со своим номером в списке выбрать вещество и определить температуру пламени при горении индивидуального вещества. Горение происходит при $t = 20^\circ$ и давлении 760 мм рт. ст.

Контрольные вопросы

1. Что такое тепловой эффект химической реакции и от чего он зависит?
2. Что такое температура горения, какие виды ее используются и для чего?
3. Что такое диссоциация продуктов горения?
4. Какие величины связывает закон Кирхгофа и почему?

Практическая работа № 4

ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕ ПРИ ГОРЕНИИ И ВЗРЫВЕ

Цель работы: закрепить навык составления химического уравнения горения, определения состава горючей среды и расхода воздуха при горении. Определить основные параметры горения горючих веществ в адиабатических условиях из химического уравнения горения индивидуального вещества и смеси горючих: термохимическое значение теплоты сгорания, определить объем воздуха, необходимый для горения горючего вещества, количество образующихся продуктов при горении.

Время выполнения: 6 часов (2 часа – аудиторная работа, 4 часа – самостоятельная).

Задачи работы

1. Выполнить контрольное задание по теме «Термохимические процессы при горении».
2. Ответить на теоретические контрольные вопросы.
3. Оформить результаты в виде отчета согласно требованиям.

Перечень обеспечивающих средств: компьютерное и мультимедийное оборудование, установленное в аудитории, нормативно-правовая документация.

Требования к отчету

Выполнить задание в соответствии с технологией выполнения работы. Полученные результаты представить в виде отчета. Шрифт текста Times New Roman, размер шрифта 14, межстрочный интервал 1,5, абзацный отступ 1 см.

Технология выполнения работы

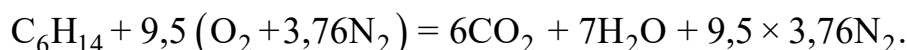
Используя данные, полученные в ходе выполнения практических работ, в соответствии со своим номером в списке выбрать вариант контрольных заданий и решить следующим образом.

1. Рассчитать термохимическое значение теплоты сгорания в единицах измерения МДж/кг и МДж/м³ индивидуального соединения паров гексана (C₆H₁₄).

Решение. Энтальпия образования гексана при 25 °С:

$$\Delta H^0(\text{C}_6\text{H}_{14}) = -167,2 \text{ кДж/моль.}$$

Запишем химическое уравнение горения гексана:



Используя закон Гесса, вычисляем теплоту реакции:

$$\Delta H^0_{\text{реакции}} = (\Delta H^0(\text{C}_6\text{H}_{14}))(\Delta H^0(\text{C}_6\text{H}_{14}) + 9,5\Delta H^0(\text{O}_2 + 3,76\Delta H^0(\text{N}_2)) - (6\Delta H^0(\text{CO}_2) + 7\Delta H^0(\text{H}_2\text{O}) + 9,5 \cdot 3,76\Delta H^0(\text{N}_2))), \text{ кДж/моль.}$$

Энтальпия образования простых веществ – $\Delta H^0(\text{O}_2)$ и $\Delta H^0(\text{N}_2)$ – в стандартных условиях приняты равными 0, а энтальпии образования других веществ берем из таблицы:

$$\Delta H^0(\text{C}_6\text{H}_{14}) = -167,2 \text{ кДж/моль;}$$

$$\Delta H^0(\text{H}_2\text{O}) = -241,8 \text{ кДж/моль;}$$

$$\Delta H^0(\text{CO}_2) = -393,5 \text{ кДж/моль.}$$

Подставляем в формулу (учитывая раскрытие скобок, когда произведение минуса на минус дает положительное число) и получаем

$$\Delta H^0_{\text{реакции}} = -167,2 - 6 \cdot (-393,5) - 7 \cdot (-241,8) = 3\,886,4 \text{ кДж/моль.}$$

Вычисляем молекулярную массу гексана:

$$M_{(\text{толуола})} = 6 \cdot 12 + 14 \cdot 1 = 86 \text{ г/моль.}$$

Вычисляем количество молей в 1 кг:

$$v_{(\text{гексана})} = (1[\text{кг}] \cdot 1\,000[\text{г/кг}]) / M[\text{г/моль}] = 1\,000 / 86 = 11,62 \text{ молей.}$$

Вычисляем теплоту горения при 25 °С в единицах измерения МДж/кг:

$$Q_{\text{гор(гексана)}} = \Delta H^0_{\text{реакции}} \cdot \nu_{\text{(гексана)}} = \Delta H^0_{\text{реакции}} \cdot (11,62) \text{кДж/кг};$$

$$Q_{\text{гор(гексана)}} = 3\,886,4 \cdot 1\,000 / 86 = 45\,190 \text{ кДж/кг} = 45,1 \text{ МДж/кг}.$$

Вычисляем теплоту горения при 25 °С в единицах измерения МДж/м³:

$$Q_{\text{гор(гексана)}} = 3\,886,4 \cdot 1\,000 / 24,47 = 158\,823 \text{ кДж/м}^3 = 159 \text{ МДж/м}^3.$$

Ответ: 45,1 МДж/кг или 159 МДж/м³.

2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при эквивалентном соотношении топлива к кислороду $\varphi = 1$.

Решение.

Определяем низшую теплоту сгорания гексана: 1 158 823 кДж/м³.

Определяем объем продуктов сгорания 1 м³ гексана. Общее количество молей продуктов сгорания получаем суммированием:

$$\nu = 6 + 7 + 9,5 \cdot 3,76 = 48,72 \text{ молей}.$$

Если при сжигании 1 моля гексана мы получаем 48,72 молей, то при сжигании 1 м³ получим 48,72 м³. Это связано с тем, что моль – объемная величина.

Подставляя эти величины в формулу, получаем

$$\Delta t_{\text{max}} = \frac{158\,823}{48,72 \cdot 1,67} = 1\,952.$$

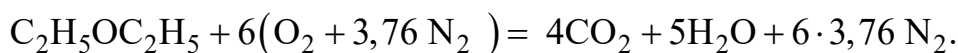
Если начальная температура 20 °С, то максимальная или адиабатическая температура пламени:

$$T_{\text{ад}} = \Delta t_{\text{ад}} + 20 \text{ (}^\circ\text{C)} = 1\,972 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Ответ: 1 972 °С.

3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 2 м³ диэтилового эфира при –20 °С и давлении 750 мм рт. ст.

Решение. Записываем уравнение реакции горения диэтилового эфира:



По уравнению реакции найдем теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания 1 м³ диэтилового эфира:

$$V_{\text{теор}} = 6(1 + 3,76) = 28,56 \text{ м}^3.$$

Если для 1 м³ эфира необходимо 28,56 м³, то для 2 м³ объем воздуха для горения составит

$$V_{\text{н.в}} = 28,56 \cdot 2 = 57,12 \text{ м}^3.$$

Молярный объем диэтилового эфира и воздуха V_M в задаче находятся при одинаковой температуре и давлении, следовательно, нет необходимости применять уравнение состояния идеального газа.

Ответ: $V_{\text{н.в}} = 57,12 \text{ м}^3$.

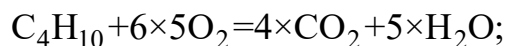
4. Пользуясь законами Гесса, рассчитать теплоту сгорания (МДж/м³) газовой смеси (в объемных %): 47 % пропана и 53 % бутана.

Решение. В 1 м³ смеси горючих газов:

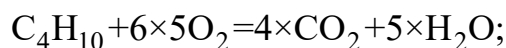
$$\text{C}_3\text{H}_8 - 47 \% = 470 \text{ л}, \Delta_f H_{\text{gas}}^0 (\text{C}_3\text{H}_8) = -105 \text{ кДж/моль};$$

$$\text{C}_4\text{H}_{10} - 53 \% = 530 \text{ л}, \Delta_f H_{\text{gas}}^0 (\text{C}_4\text{H}_{10}) = -126 \text{ кДж/моль}.$$

Запишем химическое уравнение горения:



$$Q_r(\text{C}_3\text{H}_8) = 105 + (3 \cdot (-394) + 4 \cdot (-242)) = 2045 \text{ кДж/моль};$$



$$Q_r(\text{C}_4\text{H}_{10}) = -126 - (4 \cdot (-394) + 5 \cdot (-242)) = 2660 \text{ кДж/моль}.$$

При стандартных условиях 20 °С и 1 атм 1 моль газа занимает 24,22 литра:

$$Q_r = \left(2045 \cdot \frac{470}{24,22} + 2660 \cdot \frac{530}{24,22} \right) = 98,6 \cdot 10^3 \text{ кДж/м}^3.$$

Ответ: $Q_r = 98,6 \text{ МДж/м}^3$.

5. Определить низшую и высшую теплоты сгорания (МДж/кг) торфа (состав подобрать из справочной таблицы).

Решение.

Согласно данным справочной таблицы подбираем состав торфа (или используя данные анализатора РЕ 2400–II, который использует метод сжигания образца для превращения в простые газы CO_2 , H_2O , N_2 и SO_2):

C – 50 %, H – 6,5 %, O – 40 %, N – 2 %, S – 1,5 %.

Проверочная сумма: $50 \% + 6,5 \% + 40 \% + 2 \% + 1,5 \% = 100\%$.

Торф – сложное вещество, поэтому воспользуемся методом Д. И. Менделеева. Формула для определения высшей теплоты сгорания:

$$Q_v = 81[C] + 300[H] + 26([S] - [O] - [N]) \text{ (ккал/кг)},$$

где [S], [N], [C], [H], [O] – массовое содержание в % в горючем веществе серы, азота, углерода, водорода и кислорода соответственно.

Низшая теплота сгорания отличается на теплоту конденсации водяного пара, которая равна 44 кДж/моль:

$$Q_n = 81[C] + 300[H] + 26([S] - [O] - [N]) - 6(9[H] + W) \text{ (ккал/кг)},$$

где W – массовое содержание влаги, масс. %.

Высшая теплота сгорания:

$$Q_v = 81 \cdot 50 + 300 \cdot 6,5 + 26(1,5 - 40 - 2) = 4\,947 \text{ ккал/кг} = 21 \text{ М Дж/кг}.$$

Низшая теплота сгорания:

$$\begin{aligned} Q_n &= 81 \cdot 50 + 300 \cdot 6,5 + 26(1,5 - 40 - 2) - 6(9 \cdot 6,5 + 0) = \\ &= 4\,596 \text{ ккал/кг} = 19 \text{ МДж/кг}. \end{aligned}$$

Ответ: $Q_v = 21 \text{ МДж/кг}$, $Q_n = 19 \text{ М Дж/кг}$.

Задание

1. В соответствии с вариантом расчетного задания найти в справочной табл. П.1 приложения структурную или брутто-формулу вещества и его энтальпию образования.

2. Составить химическое уравнение горения.
3. Пользуясь законом Гесса и химическим уравнением горения, определить термохимическую теплоту сгорания.
4. Определить объем воздуха, необходимый для полного сжигания вещества, используя химическое уравнение горения.
5. В соответствии с вариантом расчетного задания найти в справочной табл. П.2–П.5 приложения элементный состав сложного органического топлива и определить нижнюю и верхнюю теплоты сгорания с помощью эмпирического уравнения Менделеева (пример приведен в практической работе № 2).

Вариант 1

1. Рассчитать термохимическое значение теплоты сгорания (МДж/кг) индивидуального соединения толуола ($C_6H_5CH_3$).
2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при $\varphi = 1$.
3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 2 кг бензола (ж) при $-20\text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 740 мм рт. ст.
4. Пользуясь законом Гесса, рассчитать теплоту сгорания (МДж/кг) смеси (в массовых процентах): 20 % этанола и 80 % метанола.
5. Определить высшую и низшую теплоты сгорания (МДж/кг) антрацита (состав подобрать из справочной таблицы).

Вариант 2

1. Рассчитать термохимическое значение теплоты сгорания (МДж/кг) индивидуального соединения этанола (C_2H_5OH).
2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при $\varphi = 1$.
3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 2 кг бутилового спирта (ж) при $20\text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 765 мм рт. ст.
4. Пользуясь законом Гесса, рассчитать теплоту сгорания (МДж/кг) смеси (в массовых процентах): 10 % толуола и 90 % метанола.

5. Определить высшую и низшую теплоты сгорания (МДж/кг) сосны (состав подобрать из справочной таблицы).

Вариант 3

1. Рассчитать термохимическое значение теплоты сгорания (МДж/кг) индивидуального соединения метанола (CH_3OH).

2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при $\varphi = 1$.

3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 3 кг пропилового спирта (ж) при $30\text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 750 мм рт. ст.

4. Пользуясь законом Гесса, рассчитать теплоту сгорания (МДж/кг) смеси (в массовых процентах): 24 % толуола и 76 % этанола.

5. Определить высшую и низшую теплоты сгорания (МДж/кг) древесины (состав подобрать из справочной таблицы).

Вариант 4

1. Рассчитать термохимическое значение теплоты сгорания (МДж/м³) индивидуального соединения метана (CH_4).

2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при $\varphi = 1$.

3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 10 м³ пропана при $-10\text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 750 мм рт. ст.

4. Пользуясь законом Гесса, рассчитать теплоту сгорания (МДж/кг) смеси (в массовых процентах): 32 % бензола и 68 % толуола.

5. Определить высшую и низшую теплоты сгорания (МДж/кг) нефти (состав подобрать из справочной таблицы).

Вариант 5

1. Рассчитать термохимическое значение теплоты сгорания (МДж/м³) индивидуального соединения этана (C_2H_6).

2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при $\varphi = 1$.

3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 2 м^3 пропана при $10 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 760 мм рт. ст.

4. Пользуясь законом Гесса, рассчитать теплоту сгорания (МДж/кг) смеси (в массовых процентах): 42% толуола и 58% этилбензола.

5. Определить высшую и низшую теплоты сгорания (МДж/кг) бурого угля (состав подобрать из справочной таблицы).

Вариант 6

1. Рассчитать термодинамическое значение теплоты сгорания (МДж/м³) индивидуального соединения ацетилена (C_2H_2).

2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при $\varphi = 1$.

3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 3 м^3 пропана при $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 750 мм рт. ст.

4. Пользуясь законом Гесса, рассчитать теплоту сгорания (МДж/кг) смеси (в массовых процентах): 18% этилбензола и 82% этилового спирта.

5. Определить высшую и низшую теплоты сгорания (МДж/кг) целлюлозы (состав подобрать из справочной таблицы).

Вариант 7

1. Рассчитать термодинамическое значение теплоты сгорания (МДж/м³) индивидуального соединения этилацетата.

2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при $\varphi = 1$.

3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 5 м^3 пропана при $5 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 760 мм рт. ст.

4. Пользуясь законами Гесса, рассчитать теплоту сгорания (МДж/м³) газовой смеси (в объемных процентах): 16% ацетилена и 84% пропана.

5. Определить высшую и низшую теплоты сгорания (МДж/кг) бурого угля (состав подобрать из справочной таблицы).

Вариант 8

1. Рассчитать термодинамическое значение теплоты сгорания (МДж/кг) индивидуального соединения ацетона.

2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при $\varphi = 1$.

3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 6 м^3 пропана при $10 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 755 мм рт. ст.

4. Пользуясь законами Гесса, рассчитать теплоту сгорания (МДж/м³) газовой смеси (в объемных процентах): 29% паров октана и 71% гексана.

5. Определить высшую и низшую теплоты сгорания (МДж/кг) сланцев (состав подобрать из справочной таблицы).

Вариант 9

1. Рассчитать термодинамическое значение теплоты сгорания (МДж/кг) индивидуального соединения октана.

2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при $\varphi = 1$.

3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 9 м^3 бутана при $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 750 мм рт. ст.

4. Пользуясь законами Гесса, рассчитать теплоты сгорания (МДж/м³) газовой смеси (в объемных процентах): 80% паров метанола и 20% бутена.

5. Определить высшую и низшую теплоты сгорания (МДж/кг) бурого угля (С – $73,9 \%$, Н – $4,8 \%$, О – $8,2 \%$, N – $1,1 \%$, S – $1,5 \%$, W – 6% , золы – $4,5 \%$).

Вариант 10

1. Рассчитать термодинамическое значение теплоты сгорания (МДж/кг) индивидуального соединения глюкозы (C₆H₁₂O₆).

2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при $\varphi = 1$.

3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 4 м^3 бутана при $30 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 750 мм рт. ст.

4. Пользуясь законами Гесса, рассчитать теплоту сгорания (МДж/м^3) газовой смеси (в объемных процентах): 85% паров этилена и 15% пентанола.

5. Определить высшую и низшую теплоты сгорания (МДж/кг) бурого угля ($\text{C} - 70,9 \%$, $\text{H} - 7,8 \%$, $\text{O} - 6,2 \%$, $\text{N} - 1,1 \%$, $\text{S} - 1,5 \%$, $\text{W} - 8 \%$, золы $- 4,5 \%$).

Вариант 11

1. Рассчитать термохимическое значение теплоты сгорания (МДж/м^3) индивидуального соединения метилацетата.

2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при $\varphi = 1$.

3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 3 кг винилбензола (C_8H_8) при $15 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 765 мм рт. ст.

4. Пользуясь законами Гесса, рассчитать теплоту сгорания (МДж/м^3) газовой смеси (в объемных процентах): 18% формальдегида и 82% этана.

5. Определить низшую и высшую теплоты сгорания (МДж/кг) сосны ($\text{C} - 46,9 \%$, $\text{H} - 4,8 \%$, $\text{O} - 35,2 \%$, $\text{N} - 1,1 \%$, $\text{S} - 1,5 \%$, $\text{W} - 6 \%$, золы $- 4,5 \%$).

Вариант 12

1. Рассчитать термохимическое значение теплоты сгорания (МДж/м^3) индивидуального соединения этилацетата.

2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при $\varphi = 1$.

3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 2 кг глюкозы при $10 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 748 мм рт. ст.

4. Пользуясь законами Гесса, рассчитать теплоту сгорания (МДж/м^3) газовой смеси (в объемных процентах): 38% ацетилен и 62% пропилена.

5. Определить высшую и низшую теплоты сгорания (МДж/кг) бурого угля (С – 59,8 %, Н – 4,6 %, О – 18,2 %, S – 1,2 %, W – 10 %, золы – 6,2 %).

Вариант 13

1. Рассчитать термодинамическое значение теплоты сгорания (МДж/м³) индивидуального соединения октана (C₈H₁₈).

2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при $\varphi = 1$.

3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 3 кг ацетона (ж) при –20 °С и давлении 740 мм рт. ст.

4. Пользуясь законами Гесса, рассчитать теплоту сгорания (МДж/м³) газовой смеси (в объемных процентах): 31 % пропана и 69 % этилена.

5. Определить низшую и высшую теплоты сгорания (МДж/кг) дуба (состав подобрать из справочной таблицы).

Вариант 14

1. Рассчитать термодинамическое значение теплоты сгорания (МДж/м³) индивидуального соединения паров «идеального» бензина (C₈H₁₈).

2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при $\varphi = 1$.

3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 5 м³ ацетилену при –18 °С и давлении 748 мм рт. ст.

4. Пользуясь законами Гесса, рассчитать теплоту сгорания (МДж/м³) газовой смеси (в объемных процентах): 22 % этилена и 78 % этана.

5. Определить высшую и низшую теплоты сгорания (МДж/кг) хлопка (состав подобрать из справочной таблицы).

Вариант 15

1. Рассчитать термодинамическое значение теплоты сгорания (МДж/м³) индивидуального соединения паров гексана (C₆H₁₄).

2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при $\varphi = 1$.

3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 2 м^3 диэтилового эфира при $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 750 мм рт. ст.

4. Пользуясь законами Гесса, рассчитать теплоту сгорания (МДж/м^3) газовой смеси (в объемных процентах): 47% пропана и 53% бутана.

5. Определить низшую и высшую теплоты сгорания (МДж/кг) сосны (состав подобрать из справочной таблицы).

Вариант 16

1. Рассчитать термохимическое значение теплоты сгорания (МДж/кг) индивидуального соединения пропилового спирта ($\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$).

2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при $\varphi = 1$.

3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 3 кг бутилового спирта ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$) (ж) при $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 740 мм рт. ст.

4. Пользуясь законом Гесса, рассчитать теплоту сгорания (МДж/кг) смеси (в массовых процентах): 33% бутилового спирта и 67% пропилового спирта.

5. Определить высшую и низшую теплоты сгорания (МДж/кг) антрацита (состав подобрать из справочной таблицы).

Вариант 17

1. Рассчитать термохимическое значение теплоты сгорания (МДж/кг) индивидуального соединения бутилового спирта ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$).

2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при $\varphi = 1$.

3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 2 кг пентанола ($\text{C}_5\text{H}_{11}\text{OH}$) при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 765 мм рт. ст.

4. Пользуясь законом Гесса, рассчитать теплоту сгорания (МДж/кг) смеси (в массовых процентах): 17% толуола и 83% метанола.

5. Определить высшую и низшую теплоты сгорания (МДж/кг) дуба (состав подобрать из справочной таблицы).

Вариант 18

1. Рассчитать термохимическое значение теплоты сгорания (МДж/кг) индивидуального соединения пентанола ($C_5H_{11}OH$).

2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при $\varphi = 1$.

3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 4 кг ацетона ($CH_3-C(O)-CH_3$) (ж) при $30\text{ }^\circ C$ и давлении 750 мм рт. ст.

4. Пользуясь законом Гесса, рассчитать теплоту сгорания (МДж/кг) смеси (в массовых процентах): 15 % толуола и 85 % этанола.

5. Определить высшую и низшую теплоты сгорания (МДж/кг) целлюлозы (состав подобрать из справочной таблицы).

Вариант 19

1. Рассчитать термохимическое значение теплоты сгорания (МДж/м³) индивидуального соединения паров метилацетата (CH_3COOCH_3).

2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при $\varphi = 1$.

3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 5 м³ водорода при $-20\text{ }^\circ C$ и давлении 740 мм рт. ст.

4. Пользуясь законами Гесса, рассчитать теплоту сгорания (МДж/м³) газовой смеси (в объемных %): 26 % этилена и 74 % этана.

5. Определить низшую теплоты сгорания (МДж/кг) хлопка (состав подобрать из справочной таблицы).

Вариант 20

1. Рассчитать термохимическое значение теплоты сгорания (МДж/кг) индивидуального соединения толуола ($C_6H_5CH_3$).

2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при $\varphi = 1$.

3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 2 кг бензола (ж) при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 740 мм рт. ст.

4. Пользуясь законом Гесса, рассчитать теплоту сгорания (МДж/кг) смеси (в массовых %): 20 % этанола и 80 % метанола.

5. Определить высшую и низшую теплоты сгорания (МДж/кг) антрацита (состав подобрать из справочной таблицы).

Вариант 21

1. Рассчитать термохимическое значение теплоты сгорания (МДж/кг) индивидуального соединения этанола ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$).

2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при $\varphi = 1$.

3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 2 кг бутилового спирта (ж) при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 765 мм рт. ст.

4. Пользуясь законом Гесса, рассчитать теплоту сгорания (МДж/кг) смеси (в массовых процентах): 10 % толуола и 90 % метанола.

5. Определить высшую и низшую теплоты сгорания (МДж/кг) сосны (состав подобрать из справочной таблицы).

Вариант 22

1. Рассчитать термохимическое значение теплоты сгорания (МДж/кг) индивидуального соединения метанола (CH_3OH).

2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при $\varphi = 1$.

3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 3 кг пропилового спирта (ж) при $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 750 мм рт. ст.

4. Пользуясь законом Гесса, рассчитать теплоту сгорания (МДж/кг) смеси (в массовых процентах): 24 % толуола и 76 % этанола.

5. Определить высшую и низшую теплоты сгорания (МДж/кг) древесины – сосна (состав подобрать из справочной таблицы).

Вариант 23

1. Рассчитать термохимическое значение теплоты сгорания (МДж/м³) индивидуального соединения метана (СН₄).

2. Пользуясь упрощенной формулой, определить максимальную температуру продуктов сгорания при сжигании в воздухе вещества из задачи 1 при $\varphi = 1$.

3. Определить объем воздуха, необходимый для горения 10 м³ пропана при –10 °С и давлении 750 мм рт. ст.

4. Пользуясь законом Гесса, рассчитать теплоту сгорания (МДж/кг) смеси (в массовых процентах): 32 % бензола и 68 % толуола.

5. Определить высшую и низшую теплоты сгорания (МДж/кг) нефти (состав подобрать из справочной таблицы).

Контрольные вопросы

1. Какие параметры можно определить из химического уравнения горения веществ в адиабатических условиях?

2. Как определить объем воздуха, необходимый для горения горючего вещества?

3. Какой закон используется для определения термохимического значения теплоты сгорания?

КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В ПАРОВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ

Практическая работа № 5 ПОКАЗАТЕЛИ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: освоение методики расчетов концентрационных и температурных пределов распространения пламени, определяющих некоторые критические условия возникновения и распространения горения.

Время выполнения: 5 часов (2 – аудиторная работа, 3 часа – самостоятельная).

Задачи

1. Ознакомиться с основными понятиями и определениями.
2. Выполнить расчетное задание согласно рекомендациям, изложенным в теоретической части практической работы, используя справочные таблицы и нормативные документы.
3. Письменно ответить на контрольные вопросы.
4. Оформить результаты в виде отчета согласно требованиям.

Перечень обеспечивающих средств: компьютерное и мультимедийное оборудование, установленное в аудитории, нормативно-правовая документация.

Общие теоретические сведения

Для возникновения и распространения горения в паровоздушных смесях в первую очередь необходимо, чтобы окислитель смешался с горючим. Образовавшаяся смесь при аварии случайной искрой или в результате нагрева может быть подожжена. Для того чтобы возникла вспышка или устойчивое горение, концентрация кислорода и горючего должна иметь определенное значение. То есть для процессов горения характерно наличие критических условий

возникновения и распространения пламени по составу горючей среды, давлению, температуре, геометрическим размерам очага горения. Перечень показателей, необходимых для оценки пожарной опасности веществ и материалов в зависимости от их агрегатного состояния, установлен в приложении «Таблицы показателей пожарной безопасности» к ФЗ-123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [1] и изначально разъяснен в НПБ 23–2001 «Пожарная опасность технологических сред. Номенклатура показателей» [8].

В правоустанавливающих документах применяются следующие обозначения и сокращения:

- НКПР – нижний концентрационный предел распространения пламени;
- ВКПР – верхний концентрационный предел распространения пламени;
- КПРП – концентрационные пределы распространения пламени;
- ДВК – довзрывная концентрация (это понятие установлено в требованиях взрывопожаробезопасности на опасных производственных объектах);
- МВСК – минимальное взрывоопасное содержание кислорода;
- ВТПР – верхний температурный предел распространения пламени;
- НТПР – нижний температурный предел распространения пламени.

Наиболее важным показателем является НКПР. Он определяет размер взрывоопасной зоны при утечке газа или горючей жидкости. Размеры взрывоопасной зоны равны расстоянию, на котором существует взрывоопасная газовая смесь до того, как она будет разбавлена до концентрации ниже НКПР. Область распространения газа или пара при их разбавлении до концентрации ниже НКПР, как правило, оценивается с участием эксперта в рамках соответствия оборудования ГОСТ 31610.10–2012 «Электрооборудование для взрывоопасных газовых сред. Часть 10. Классификация взрывоопасных зон». При оценке опасности всегда необходимо учитывать возможность того, что газ может присутствовать на участках ниже уровня земли (например, в колодцах и котлованах), если он тяжелее воздуха. Газ, который легче воздуха, может присутствовать в помещениях на высоте (например, на чердаках). Если источник утечки находится за пределами зоны или в смежной зоне, проникновение значительного количества горючего газа или пара в зону можно предупредить соответствующими средствами, например:

- механическими препятствиями;
- поддержанием достаточного избыточного давления в рабочей зоне по сравнению со смежными опасными зонами для предотвращения проникновения взрывоопасной газовой смеси;
- продувкой зоны достаточным потоком свежего воздуха, чтобы воздух выходил из всех отверстий, в которые может войти горючий газ или пар.

Условия пожароопасности зависят от химических и физических характеристик горючего вещества. При определенной температуре давление насыщенных паров над жидкостью будет достаточным для образования горючей смеси с воздухом. Эти температуры называются нижний t_n (°C) и верхний t_v (°C) температурные пределы воспламенения. ВТПР и НТПР характерны только для жидкостей. Эти величины определяются давлением насыщенных паров над поверхностью жидкости. Зависимость давления насыщенных паров нефтепродуктов от температуры в общем виде может быть описана уравнением Клаузиуса – Клапейрона. Для практического применения и удобства используется расчетная температура воздуха t_p , выраженная в °C, и преобразованное уравнение Клаузиуса – Клапейрона в виде следующей формулы:

$$\lg(P_n) = \left[A - \frac{B}{t_p + C_A} \right] \text{ или } P_n = 10^{\left[A - \frac{B}{t_p + C_A} \right]} \text{ (кПа)}. \quad (5.1)$$

Из справочной литературы находятся значения констант Антуана A , B и C_A . В зависимости от размерности P_n в разных таблицах могут быть различные значения констант Антуана. В табл. П.15 приложения к данному практикуму приведены значения констант Антуана для размерности в кПа.

ВТПР и НТПР можно определить, если известны значения концентрационного предела распространения пламени НКПР (или ВКПР) в процентах, а также коэффициенты Антуана. Формула для вычисления этих значений прямо вытекает из уравнения (5.1):

$$t_n = \frac{B}{A - \lg\left(\frac{\text{НКПР}}{100} P_{\text{атм}}\right)} - C_a. \quad (5.2)$$

Важной характеристикой является площадь разлива жидкости. В помещениях категории А и Б площадь испарения при разливе на пол определяют, исходя из расчета, что 1 л смесей и растворов, содержащих по массе 70 % и менее растворителей, разливается на площади 0,5 м², а остальных жидкостей – на 1 м² пола помещения, но не больше размера помещения (ГОСТ Р 12.3.047–2012, приложение А [3] и пункт А.1.2 свода правил СП 12.13130.2009) [4].

Интенсивность испарения W (кг/м² в секунду) определяется по справочным и экспериментальным данным. Для ЛВЖ, имеющих температуру окружающей среды t_p и при отсутствии данных допускается рассчитывать W по формуле

$$W = P_n \cdot 10^{-6} \eta M^{1/2}, \quad (5.3)$$

где P_n – давление насыщенных паров жидкости при t_p , кПа;

M – молярная масса жидкости, кг/кмоль;

η – безразмерный коэффициент зависимости интенсивности испарения от скорости воздушного потока и t_p .

Количество испарившегося горючего определяется формулой

$$m(\text{кг}) = W \times S (\text{м}^2) \times \tau(\text{с}). \quad (5.4)$$

Безразмерный коэффициент зависимости интенсивности испарения η от скорости воздушного потока определяется из табл. 5.1.

Таблица 5.1. Значение коэффициента η в зависимости от скорости и температуры воздушного потока в помещении [4]

Скорость воздушного потока в помещении, м/с	Значение коэффициента η при температуре t_p воздуха в помещении, °С				
	10	15	20	30	35
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,1	3,0	2,6	2,4	1,8	1,6
0,2	4,6	3,8	3,5	2,4	2,3
0,5	6,6	5,7	5,4	3,6	3,2
1,0	10,0	8,7	7,7	5,6	4,6

Скорость воздушного потока в помещении равна 0, если нет вентиляции. При ее наличии скорость воздушного потока определяется формулой $U = A \cdot L$, где A – кратность воздухообмена аварийной вентиляции (1/с) и L – длина помещения (м).

Задание

I. В соответствии со своим номером в списке обучающихся выбрать вещество и оценить НКПР, ВКПР, МВСК и минимальную огнетушащую концентрацию углекислотного газового средства пожаротушения в точке флегматизации. Оценить, возможно ли горение этого вещества при отрицательной температуре -10 °С и давлении 740 мм рт. ст.

II. Определить количество испарившейся в помещении жидкости после разрушения 10-литрового сосуда в течение 3 600 секунд. Коэффициент $\eta = 1$. Температура 20 °С. Плотность жидкости 0,88 кг/литр:

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1) гептан; | 14) бутиловый спирт; |
| 2) декан; | 15) окись этилена; |
| 3) 1, 4-диоксан; | 16) изопропилбензол; |
| 4) тетрагидрофуран; | 17) диэтиловый эфир; |
| 5) циклопропан; | 18) этилацетат; |
| 6) гексан; | 19) амилацетат; |
| 7) бензол; | 20) анилин; |
| 8) толуол; | 21) метилацетат; |
| 9) м-ксилол; | 22) циклогексан; |
| 10) о-ксилол; | 23) метиловый спирт; |
| 11) изобутан; | 24) метилциклогексан; |
| 12) этиловый спирт; | 25) этилциклопентан; |
| 13) пропиловый спирт; | 26) амиловый спирт. |

1. Выполнить расчетное задание согласно рекомендациям, изложенным в теоретической части практической работы, используя справочные таблицы и нормативные документы.

2. Ответить на теоретические контрольные вопросы.

3. Оформить результаты в виде отчета согласно требованиям.

Требования к отчету

Выполнить задание в соответствии с технологией выполнения работы. Полученные результаты представить в виде отчета. Шрифт текста Times New Roman, размер шрифта 14, межстрочный интервал 1,5, абзацный отступ 1 см.

Технология выполнения работы

1. Изучить практическую работу № 2 по дисциплине «Теория горения и взрыва» [13].

2. В соответствии со своим номером в списке обучаемых выбрать вещество и оценить НКПР, ВКПР, МВСК и минимальную огнетушащую концентрацию углекислотного газового средства пожаротушения индивидуального вещества. Возможно ли горение этого вещества при отрицательной температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 740 мм рт. ст.?

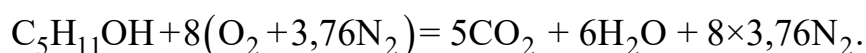
3. Использовать данные из табл. П.1, П.15 приложения.

Вещество: амиловый спирт.

Решение.

НКПР, ВКПР.

Записываем уравнение реакции горения амилового спирта:



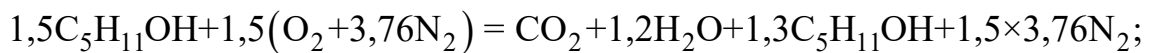
При эквивалентном соотношении топлива и кислорода $\varphi = 0,5$ химическое уравнение горения $\text{C}_5\text{H}_{11}\text{OH}$ в воздухе будет выглядеть следующим образом:



$$\text{НКПР}(\text{C}_5\text{H}_{11}\text{OH}) = \frac{0,5 \cdot 100\%}{0,5 + 8 + 8 \cdot 3,76} = 1,29\%.$$

Экспериментально измеренное значение НКПР $\text{C}_5\text{H}_{11}\text{OH}$ – 1,46 %. Относительная ошибка составила -12% .

При определении ВКПР при эквивалентном соотношении топлива и кислорода $\varphi = 1,5$ химическое уравнение горения метанола будет выглядеть следующим образом:



$$VKPR(C_5H_{11}OH) = \frac{1,5 \cdot 100 \%}{(1,5 + 1,5 \cdot (1 + 3,76))} = 17,36 \%$$

Минимальное взрывоопасное содержание кислорода (МВСК) в объемных процентах рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned} MBCK &= (100 - C_{птв} - C_{гор}) C_{O_2} / 100 = \\ &= (100 - 24,64 - 2,99) 21 / 100 = 15,2 \%. \end{aligned}$$

Минимальная огнетушащая концентрация углекислотного газового средства пожаротушения индивидуального вещества:

$$\begin{aligned} C_{птв} &= \frac{100v_{птв}}{(v_{птв} + 1 + 2,42 \cdot 0,5n_H - n_O)} = \\ &= \frac{100 \cdot 8,24}{(8,24 + 1 + 2,42 \cdot 0,5 \cdot 12 - 1)} = 24,64 \%; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_{птв} &= (0,232n_C + 1,88n_H - 1,98n_O - 0,5n_N + 0,0287\Delta H^0) / \gamma = \\ &= (0,232 \cdot 5 + 1,88 \cdot 12 - 1,98 \cdot 1 - 0 + 0,0287 \cdot (-298)) / 1,6 = 8,24; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{гор} &= 100 / [v_{птв} + 1 + 2,42 \cdot (n_C + 0,5n_H - n_O)] = C_{птв} / v_{птв} = \\ &= 24,64 / 8,24 = 2,99 \%. \end{aligned}$$

Минимальная огнетушащая концентрация рассчитывается по формуле

$$C_{мок} = 0,47 \cdot C_{птв} = 0,47 \cdot 17,98 = 8,45 \%$$

Возможно ли горение этого вещества при отрицательной температуре $-10^\circ C$ и давлении 740 мм рт. ст.?

Переводим атмосферное давление в размерность кПа:

$$P_{\text{atm}} = 101,3(\text{кПа}) \cdot 740(\text{мм рт. ст.}) / 760(\text{мм рт. ст.}) = 98,63 \text{ кПа.}$$

Находим из справочной таблицы коэффициенты Антуана – А, В, С_А – они равняются соответственно 6,3073; 1287,625 и 161,330.

Используя формулу, находим нижний температурный предел распространения пламени:

$$t_{\text{н}}(\text{C}_5\text{H}_{11}\text{OH}) = 1\,287,625 / [6,3073 - \lg(1,29 \cdot 98,63 / 100)] - 161,330 = 46 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Нижний температурный предел выше нуля, поэтому горение амилового спирта при отрицательной температуре невозможно.

Ответ: НКПР = 1,29 %; ВКПР = 17,36 %; МВСК = 15,2 %; С_{мокс} = 8,45 %.

Горение амилового спирта при отрицательной температуре невозможно.

II. Определить количество испарившейся в помещении жидкости после разрушения 10-литрового сосуда в течение 3 600 секунд. Коэффициент $\eta = 1$. Температура 20 °С. Плотность жидкости 0,88 кг/литр.

Решение.

Масса пролившейся жидкости $m = 0,88 \times 10 \text{ л} = 8,8 \text{ кг.}$

Площадь пролива для индивидуального вещества $S = 10 \text{ л} \times 1 \text{ м}^2 = 10 \text{ м}^2$.

Давление насыщенных паров определяем с помощью коэффициентов Антуана из табл. П.15 приложения.

–	–	А	В	С _А
н-амиловый спирт	C ₅ H ₁₂ O	6,3073	1287,625	161,330

$$\lg(P_{\text{н}}) = \left[A - \frac{B}{t_p + C_A} \right] = 6,3073 - \frac{1\,287,625}{20 + 161,330} = 6,3073 - 7,101 = -0,7937.$$

$$P_{\text{н}} = 10^{[-0,7937]} = 0,161 \text{ (кПа).}$$

Молекулярная масса: $M = 12 \times 5 + 12 + 16 = 88$.

Интенсивность испарения W равна:

$$W = P_{\text{н}} \cdot 10^{-6} \eta M^{1/2} = 0,161 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 88^{1/2} = 1,51 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{с} \times \text{м}^2};$$

$$m(\text{кг}) = W \times S(\text{м}^2) \times \tau(\text{с}) = 1,51 \times 10^{-6} \times 10 \times 3\,600 = 0,054 \text{ кг.}$$

Ответ: вещество труднолетучее, масса пара 0,054 кг. Ситуация не пожароопасная, горение невозможно.

Контрольные вопросы

1. Что такое концентрационные пределы распространения пламени?
2. Что характеризуют показатели пожаровзрывоопасности веществ и материалов?
3. Перечислите основные показатели пожаровзрывоопасности веществ и материалов.
4. Какова цель установления в нормативных документах перечня показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов?

Практическая работа № 6

КОНЦЕНТРАЦИОННЫЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРЕДЕЛЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ

Цель работы: закрепить навык определения концентрационных и температурных пределов возникновения и распространения пламени и изучить нормативный документ ГОСТ 30852.11–2002.

Время выполнения: 6 часов (2 часа – аудиторная работа, 4 часа – самостоятельная).

Задачи

1. Выполнить контрольное задание по определению температурных пределов распространения пламени.
2. Письменно ответить на контрольные вопросы.
3. Оформить результаты в виде отчета согласно требованиям.

Перечень обеспечивающих средств: компьютерное и мультимедийное оборудование, установленное в аудитории, нормативно-правовая документация.

Порядок выполнения работы

1. Оценить нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени в воздухе индивидуального горючего вещества, используя только химическое уравнение горения.
2. Оценить КПП в воздухе смеси горючего вещества из п. 1 с метиловым спиртом CH_3OH , если соотношение веществ составляет 1 к 4 по массе.
3. Оценить НКПР смеси горючих паров/газов в воздухе из п. 2 по ее теплоте горения. Сравнить с решением из предыдущего пункта.
4. Определить возможность образования взрывоопасной концентрации в помещении объемом 150 м^3 при полном испарении 12 кг горючей жидкости из п. 1, если температура в помещении $32 \text{ }^\circ\text{C}$, а давление 745 мм рт. ст.

5. Оценить температурные пределы воспламенения насыщенных паров жидкости из п. 4 в воздухе при нормальном атмосферном давлении. Определить класс жидкости по степени пожароопасности. Сравнить с табличными данными.

6. Для выполнения требований пожарной безопасности предприятие приобрело прибор контроля концентрации взрывоопасных газов и паров. Необходимо проверить его работоспособность или провести техническое обслуживание. Произвести расчет температуры и количества жидкости из п. 5, необходимый для создания в тестовой камере объемом 10 литров паровоздушной смеси с концентрацией 50 % НКПР для определения основной абсолютной погрешности газоанализатора.

Задание

В соответствии со своим номером в списке обучающихся выбрать вещество из табл. 6.1 и согласно порядку выполнения работ оценить нижний и верхний концентрационные пределы, КПП, температурные пределы воспламенения, класс жидкости по степени пожароопасности, расчет температуры и количества жидкости для проведения технического обслуживания приборов контроля концентрации взрывоопасных газов и паров.

Таблица 6.1. Взрывоопасные смеси категории ПА (ГОСТ 30852.11–2002. Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 12. Классификация смесей газов и паров с воздухом по безопасным экспериментальным максимальным зазорам и минимальным воспламеняющим токам)

Вещество	Химическая формула	Метод классификации
1.1. Алканы		
Гексан	C_6H_{14}	с
Гептан	C_7H_{16}	с
Октан	C_8H_{18}	а
Нонан	C_9H_{20}	д
Декан	$C_{10}H_{22}$	а
Циклобутан	$CH_2(CH_2)_2CH_2$	д
Циклопентан	$CH_2(CH_2)_3CH_2$	а

Окончание таблицы 6.1.

Вещество	Химическая формула	Метод классификации
1.1. Алканы		
Циклогексан	$\text{CH}_2(\text{CH}_2)_4\text{CH}_2$	c
Метилциклобутан	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{CH}_2)_2\text{CH}_2$	d
Метилциклопентан	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{CH}_2)_3\text{CH}_2$	d
Метилциклогексан	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{CH}_2)_4\text{CH}_2$	d
Этилциклопентан	$\text{C}_2\text{H}_5\text{CH}(\text{CH}_2)_3\text{CH}_2$	d
Этилциклогексан	$\text{C}_2\text{H}_5\text{CH}(\text{CH}_2)_4\text{CH}_2$	d
1.3. Ароматические углеводороды		
Стирол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}=\text{CH}_2$	b
Изопропилбензол (метилстирол)	$\text{C}_6\text{H}_5\text{C}(\text{CH}_3)=\text{CH}_2$	a
1.4. Углеводороды бензольного ряда		
Бензол	C_6H_6	c
Толуол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$	d
Ксилол (1, 3-диметилбензол)	$\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$	a
Этилбензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{C}_2\text{H}_5$	d
Триметилбензол	$\text{C}_6\text{H}_3(\text{CH}_3)_3$	d
Нафталин	C_{10}H_8	d
Цимол	$(\text{CH}_3)_2\text{CHC}_6\text{H}_4\text{CH}_3$	
2.2. Спирты и фенолы		
Пропиловый спирт	$\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$	c
Бутиловый спирт	$\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$	a
Гептиловый спирт	$\text{C}_7\text{H}_{15}\text{OH}$	d

Требования к отчету

Выполнить задание в соответствии с технологией выполнения работы. Полученные результаты представить в виде отчета. Шрифт текста Times New Roman, размер шрифта 14, межстрочный интервал 1,5, абзацный отступ 1 см.

Технология выполнения работы:

1. Изучить практическую работу № 2 по дисциплине «Теория горения и взрыва» [13].

2. В соответствии со своим номером в списке обучающихся выбрать вещество из табл. 6.1 и согласно порядку выполнения работ оценить нижний и верхний концентрационные пределы, КПП, температурные пределы воспламенения, класс жидкости по степени пожароопасности, расчет температуры и количества жидкости для проведения технического обслуживания приборов контроля концентрации взрывоопасных газов и паров.

3. Использовать данные из табл. П1, П.15 приложения.

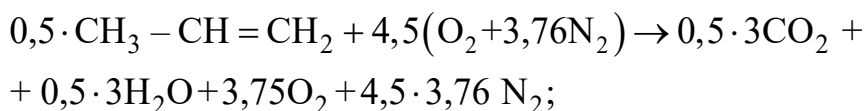
Решение. Индивидуальное вещество – пропилен ($C_2H_4=CH_2$)

1. Оценить нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени в воздухе индивидуального горючего вещества, используя только химическое уравнение горения.

Решение. Запишем уравнение реакции горения:



При эквивалентном соотношении топлива и кислорода $\varphi = 0,5$ химическое уравнение горения $C_2H_4 = CH_2$ в воздухе будет выглядеть следующим образом:

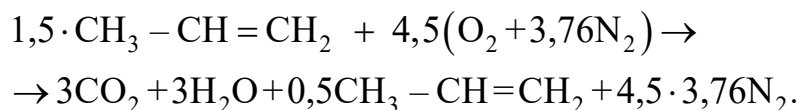


$$НКПР (C_2H_4 = CH_2) = 0,5 \cdot 100 \% / (0,5 + 4,5 + 4,5 \cdot 3,76) = 2,28 \%$$

Экспериментально измеренное значение НКПР ($C_2H_4 = CH_2$) – 2,4 %.

Относительная ошибка составила –5 %.

При определении ВКПР при эквивалентном соотношении топлива и кислорода $\varphi = 1,5$ химическое уравнение горение $C_2H_4 = CH_2$ будет выглядеть следующим образом:



$$ВКПР (C_2H_4 = CH_2) = 1,5 \cdot 100 \% / (1,5 + 4,5 + 4,5 \cdot 3,76) = 9 \%$$

Ответ: НКПР ($C_2H_4 = CH_2$) – 2,28 %; ВКПР ($C_2H_4 = CH_2$) = 9 %.

2. Оценить КППР в воздухе смеси горючего вещества из п. 1 с метиловым спиртом CH_3OH , если соотношение веществ составляет 1 к 4 по массе. Химическая формула вещества может быть записана несколькими способами: $\text{C}_2\text{H}_4 = \text{CH}_2$, или $\text{C}_2\text{H}_4\text{CH}_2$, или C_3H_6 .

Рассчитаем количество молей в 1 кг смеси. Если соотношение масс 1 к 4, то смесь жидкостей состоит из 200 г пропилена и 800 г метилового спирта. Следовательно, состав смеси в молях:

$$v(\text{C}_2\text{H}_4 = \text{CH}_2) = 200[\text{г}]/M[\text{г/моль}] = 200/42 = 4,76 \text{ моль};$$

$$v(\text{CH}_3\text{OH}) = 800[\text{г}]/M[\text{г/моль}] = 800/32 = 25 \text{ моль}.$$

Состав смеси в объемных процентах:

$$[\text{C}_2\text{H}_4 = \text{CH}_2] = 100 \% \cdot 4,76 / (4,76 + 25) = 100 \% \cdot 4,76 / (29,76) = 16 \%;$$

$$[\text{CH}_3\text{OH}] = 100 \% - 16 \% = 84 \% .$$

Оценить НКПР смеси разных веществ можно с помощью закона действующих масс Ле-Шателье:

$$\text{НКПР}(\text{смеси}) = (84 \% + 16 \%)/(84 \% / 6,42 \% + 16 \% / 2,28 \%) = 5 \%.$$

Ответ: НКПР (смеси) = 5 %.

3. Оценить НКПР смеси горючих паров/газов в воздухе из п. 2 по ее теплоте горения. Сравнить с решением из предыдущего пункта.

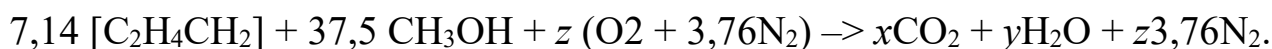
Решение. Состав смеси по объему:

$$\text{концентрация } [\text{C}_2\text{H}_4\text{CH}_2] = 100 \% \cdot 4,76 / (4,76 + 25) = 16 \%;$$

$$[\text{CH}_3\text{OH}] = 100 \% - 16 \% = 84 \%.$$

Количество молей в 1 м³: пропилен $160/22,4 = 7,14$ моля; метанол $840/22,4 = 37,5$ моля.

Составляем химическое уравнение горения 1 кг смеси:



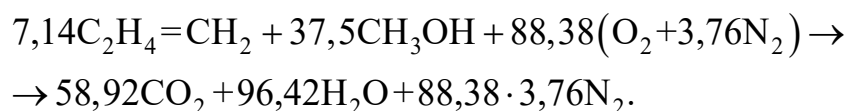
Вычисляем коэффициенты x, z, y из закона сохранения атомов в любых химических реакциях. Вычисления производим последовательно слева направо для С и Н, а для О справа налево:

$$x = 7,14 \cdot (2 + 1) + 37,5 \cdot 1 = 58,92;$$

$$y = \frac{1}{2}(7,14 \cdot (4 + 2) + 37,5 \cdot (3 + 1)) = \frac{1}{2}(42,84 + 150) = 96,42;$$

$$z = \frac{1}{2}(58,92 \cdot 2 + 96,42 - 37,5) = 88,38.$$

Подставляем коэффициенты и получаем необходимый нам вид химического уравнения горения для 1 кг смеси:



Используя закон Гесса, вычисляем теплоту горения для 1 кг смеси:

$$Q_{\text{гор(смеси)}} = [7,14\Delta H^\circ(\text{C}_2\text{H}_4 = \text{CH}_2) + 37,5\Delta H^\circ(\text{CH}_3\text{OH})] -$$

$$- [58,92\Delta H^\circ(\text{CO}_2) + 96,42\Delta H^\circ(\text{H}_2\text{O})], \text{кДж/м}^3;$$

$$Q_{\text{гор(смеси)}} = [7,14 \cdot 20,41 + 37,5 \cdot (-205)] - [58,92 \cdot (-393,51) + 96,42 \cdot (-241,83)] =$$

$$= 38\,961 \text{кДж/м}^3 = 39 \text{МДж/м}^3;$$

$$\text{НКПР} = 100 \% \cdot 1,83 / Q_{\text{гор}};$$

$$\text{НКПР}_{(\text{смеси})} = 100 \% \cdot 1,83 / 39 = 4,7 \%.$$

Исходя из решения предыдущего пункта разница в оценках составила 6,2 %.

Ответ: НКПР (смеси) = 4,7 %.

4. Определить возможность образования взрывоопасной концентрации в помещении объемом 150 м³ при полном испарении 12 кг горючей жидкости из п. 1, если температура в помещении 32 °С, а давление 745 мм рт. ст.

Решение.

Молекулярная масса 42 гр/моль, в 12 кг количество молей:

$$12 \cdot 1\,000 / 42 = 285,7 \text{ молей.}$$

Молярный объем равен:

$$V_M = \frac{22,4 \cdot (273 + 32) \cdot 760}{273 \cdot 745} = 25,53 \text{ л.}$$

Объем 285,7 молей паров пропилена $285,7 \cdot 25,53 = 7\,294$ л или $7,3 \text{ м}^3$.

Следовательно, концентрация паров пропилена в помещении объемом 150 м^3 будет равна

$$\varphi_{\text{ш}} = \frac{7,3 \cdot 100}{150} = 5 \text{ \%}.$$

Ответ: так как концентрационные пределы воспламенения пропилена в воздухе $2,28 < 5 < 9 \text{ \%}$, при полном испарении пропилена концентрация его паров в воздухе будет взрывоопасной.

5. Оценить температурные пределы воспламенения насыщенных паров жидкости из п. 4 в воздухе при нормальном атмосферном давлении. Определить класс жидкости по пожароопасности: ЛВЖ или ГЖ, также категорию помещения. Сравнить с табличными данными.

Решение. Найдем давление насыщенных паров горючей жидкости при концентрации, равной НКПР, и нормальном давлении:

$$P_H = 101,3 \text{ (кПа)} \cdot \text{НКПР} / 100 \text{ \%} = 101,3 \cdot 2,28 \text{ \%} / 100 \text{ \%} = 2,31 \text{ кПа}.$$

Найдем температуру, когда жидкость будет иметь давление насыщенных паров горючей жидкости при концентрации, равной НКПР, и нормальном давлении. Из справочных таблиц коэффициенты Антуана – А, В, СА – для пропилена равняются соответственно 5,94852; 786,532 и 247,243.

$$t_H \text{ (НКПР)} = 786,532 / (5,94852 - \lg(2,31)) - 247,243 = -106 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Ответ: $t_H \text{ (НКПР)} = -106 \text{ }^\circ\text{C}$; следовательно, жидкость относится к классу ЛВЖ, а помещение, где находится эта жидкость, к категории А.

6. Для выполнения требований пожарной безопасности предприятие приобрело прибор контроля концентрации взрывоопасных газов и паров. Необходимо проверить его работоспособность или провести техническое обслуживание. Произвести расчеты температуры и количества жидкости из п. 5, необходимые для создания в тестовой камере объемом 10 литров паровоз-

душной смеси с концентрацией 50 % НКПР для определения основной абсолютной погрешности газоанализатора.

Решение.

1. Найдем 50 % НКПР (пропилена) = $2,28 / 2 = 1,14 \%$.

2. Найдем давление насыщенных паров пропилена при концентрации, равной 50 % НКПР, и нормальном давлении:

$$P_H = 101,3 \text{ (кПа)} \cdot 50\% \text{ НКПР} / 100\% = 101,3 \cdot 1,14\% / 100\% = 1,155 \text{ кПа.}$$

3. Рассчитаем температуру с использованием уравнения Антуана:

$$t_H (50 \% \text{ НКПР}) = 786,532 / (5,94852 - \lg(1,155)) - 247,243 = -113 \text{ }^\circ\text{C} < 20 \text{ }^\circ\text{C.}$$

4. Найдем объем вещества и количество молей:

$$V = 10 \text{ (л)} \cdot 1,14\% / 100\% = 0,114 \text{ л.}$$

В стандартных условиях (ГОСТ 2939–63):

– количество молей $0,114 / 24,22 = 0,0047$;

– масса составляет $0,0047 \text{ молей} \cdot 41 = 0,1977 \sim 198 \text{ мг.}$

Ответ: масса составит 198 мг.

Контрольные вопросы

1. Дайте понятие нижнего и верхнего концентрационных пределов распространения пламени.

2. Что такое насыщенные пары и чем они характеризуются?

3. От чего зависит характеристика насыщенных паров?

4. Как называется прибор контроля выполнения требований пожарной безопасности?

ВЗРЫВОПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ, ЖИДКОСТЕЙ И ПЫЛЕЙ

Практическая работа № 7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЗРЫВОПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ

Цель работы: освоение методов расчета основных показателей взрывопожарной опасности газов и жидкостей для определения степени опасности воздействия взрыва на человека и здания и категории помещений.

Время выполнения: 4 часа (2 часа – аудиторная работа, 2 часа – самостоятельная).

Задачи работы

1. Ознакомиться с общими теоретическими сведениями.
2. Выполнить расчетное задание согласно рекомендациям, изложенным в теоретической части практической работы, используя справочные таблицы и нормативные документы.
3. Письменно ответить на контрольные вопросы.
4. Оформить результаты в виде отчета согласно требованиям.

Перечень обеспечивающих средств: компьютерное и мультимедийное оборудование, установленное в аудитории, нормативно-правовая документация.

Общие теоретические сведения

Прогнозирование пожароопасных ситуаций на производственном объекте осуществляется на основе анализа пожарной опасности каждого из технологических процессов и предусматривает выбор ситуаций, при реализации которых возникает опасность для людей, находящихся в зоне поражения опасными факторами пожара и сопутствующими проявлениями опасных факторов пожара.

К пожароопасным ситуациям не относятся ситуации, в результате которых не возникает опасность для жизни и здоровья людей. На объектах наиболее опасными поражающими факторами взрыва и пожара являются волна давления и расширяющиеся продукты сгорания при различных режимах сгорания газо-, паро- или пылевоздушного облака, а также тепловое излучение пожаров.

Взрыв – это быстрое химическое превращение среды, сопровождающееся выделением энергии и образованием сжатых газов.

При оценке пожарной опасности технологического процесса необходимо определить расчетным или экспериментальным путем:

- избыточное давление, развиваемое при сгорании газо-, паро- и пылевоздушных смесей в помещении (ГОСТ Р 12.3.047–2012, приложение А);

- размер зон, ограниченных нижним концентрационным пределом распространения пламени (НКПР) газов и паров (ГОСТ Р 12.3.047–2012, приложение Б);

- интенсивность теплового излучения при пожарах проливов для сопоставления с критическими (предельно допустимыми) значениями интенсивности теплового потока для человека и конструкционных материалов (ГОСТ Р 12.3.047–2012, приложение В);

- размеры зоны распространения облака горючих газов и паров при аварии для определения оптимальной расстановки людей и техники при тушении пожара и расчета времени достижения облаком мест их расположения (ГОСТ Р 12.3.047–2012, приложение Г);

- возможность возникновения и поражающее воздействие огненного шара при аварии для расчета радиусов зон поражения людей от теплового воздействия в зависимости от вида и массы топлива (ГОСТ Р 12.3.047–2012, приложение Д);

- параметры волны давления при сгорании газо-, паро- и пылевоздушных смесей в открытом пространстве (ГОСТ Р 12.3.047–2012, приложение Е);

- поражающие факторы при разрыве технологического оборудования вследствие воздействия на него очага пожара (ГОСТ Р 12.3.047–2012, приложение Ж);

– интенсивность испарения горючих жидкостей и сжиженных газов на открытом пространстве и в помещении (ГОСТ Р 12.3.047–2012, приложение И);

– параметры истечения жидкости и газа, а также размер сливных отверстий для горючих жидкостей в поддонах, отсеках и секциях производственных участков. При этом площадь сливного отверстия должна быть такой, чтобы исключить перелив жидкости через борт ограничивающего устройства и растекание жидкости за его пределами (ГОСТ Р 12.3.047–2012, приложение К);

– параметры паровых завес для предотвращения контакта парогазовых смесей с источниками зажигания (ГОСТ Р 12.3.047–2012, приложение Л);

– концентрационные пределы распространения пламени для горючих смесей, находящихся в технологических аппаратах и оборудовании, определяемые согласно ГОСТ 12.1.044 [9].

Выбор параметров, необходимых для оценки пожарной опасности технологических процессов, осуществляется на основе анализа специфики их пожарной опасности.

Для оценки взрыва в виде величины избыточного давления Δp (кПа) для *индивидуальных горючих веществ в виде* ГГ, ЛВЖ, ГЖ [3], состоящих из атомов С, Н, О, N, Cl, Br, I, F, в регламентирующих документах используют следующую эмпирическую формулу и параметр в виде коэффициента участия во взрыве [3]:

$$\Delta p = (p_{\max} - p_0) \cdot \frac{mZ}{V_{\text{св}} \rho_{\text{гор}}} \cdot \frac{100}{C_{\text{ст}}} \cdot \frac{1}{K_{\text{н}}}, \quad (7.1)$$

Где p_{\max} – максимальное давление, развиваемое при сгорании стехиометрической газовойоздушной или паровоздушной смеси в замкнутом объеме, определяемое экспериментально или по справочным данным в соответствии с требованиями п. 4.3 СП 12.13130.2009 [4]. При отсутствии данных допускается принимать $p_{\max} = 900$ кПа;

p_0 – начальное давление, кПа (допускается принимать 101 кПа);

m – масса горючего газа (ГГ), вышедшего из аппарата, или паров легковоспламеняющихся (ЛВЖ) и горючих жидкостей (ГЖ), вышедших в результате расчетной аварии в помещении, кг;

Z – коэффициент участия горючего при сгорании газо- или паро-воздушной смеси, который может быть рассчитан на основе характера распределения газов и паров в объеме помещения. Допускается принимать Z по табл. 7.1;

$V_{св}$ – свободный объем помещения, м³;

$\rho_{гор}$ – плотность горючего газа или пара при расчетной температуре t_p , кг/м³;

K_n – коэффициент, учитывающий «негерметичность» помещения и «неадиабатичность» процесса горения. Допускается принимать K_n равным трем;

$C_{ст}$ – стехиометрическая концентрация ГГ или паров ЛВЖ и ГЖ, %.

Плотность любого газа и пара определяется по формуле

$$\rho_{газа} = \frac{M}{V_0 \times (1 + 0,00367t_p)}, \quad (7.2)$$

где ρ_r – плотность горючего газа или пара при расчетной температуре t_p , кг/м³;

V_0 – мольный объем при нормальных условиях ($T_0 = 273,15$ К (0 °С), $P_0 = 101\,325$ Па), равный ~22,4 м³/кмоль;

M – молярная масса, кг/кмоль;

t_p – расчетная температура, °С.

Таблица 7.1. Значение коэффициента участия горючего [3]

Вид горючего вещества	Значение Z
Водород и нагретые выше температуры вспышки; высокотемпературные органические теплоносители	1,0
Горючие газы	0,5
Горючие пыли размером меньше критического	0,5
Легковоспламеняющиеся и горючие жидкости, нагретые до температуры вспышки и выше	0,3

Окончание табл. 7.1

Вид горючего вещества	Значение Z
Легковоспламеняющиеся и горючие жидкости, нагретые ниже температуры вспышки, при наличии возможности образования аэрозоля	0,3
Легковоспламеняющиеся и горючие жидкости, нагретые ниже температуры вспышки, при отсутствии возможности образования аэрозоля	0,0

В качестве расчетной температуры следует принимать максимально возможную температуру воздуха в данном помещении в соответствующей климатической зоне или максимально возможную температуру воздуха по технологическому регламенту с учетом возможного повышения температуры в аварийной ситуации. Если такое значение расчетной температуры по каким-либо причинам определить не удастся, допускается принимать ее равной 61 °С.

Горизонтальный размер взрывоопасной зоны или радиус границы НКПР $R_{\text{нкпр}}$ для газов и паров ЛВЖ определяется по формуле

$$R_{\text{нкпр}} = 7,8 \cdot \left(\frac{m}{\rho_{\text{гор}} \cdot C_{\text{нкпр}}} \right)^{0,33}, \quad (7.3)$$

где m – поступившее в открытое пространство масса горючего, кг;

$\rho_{\text{гор}}$ – плотность горючего, кг/м³;

$C_{\text{нкпр}}$ – нижний концентрационный предел распространения пламени, % об.

Высота взрывоопасной зоны определяется по формуле

$$Z_{\text{нкпр}} = 0,26 \left(\frac{m}{\rho_{\text{гор}} \cdot C_{\text{нкпр}}} \right)^{0,33}. \quad (7.4)$$

Один из способов определить величину избыточного давления, развиваемое при сгорании в открытом пространстве, возможен с использованием следующей формулы (СП 12.13130.2009 [4]):

$$P = P_0 \left(0,8 \cdot \frac{m^{0,33}_{\text{пр}}}{r} + 3 \cdot \frac{m^{0,66}_{\text{пр}}}{r^2} + 5 \cdot \frac{m_{\text{пр}}}{r^3} \right), \quad (7.5)$$

где P_0 – атмосферное давление, кПа (допускается принимать равным 101 кПа);

r – расстояние до центра облака горючей смеси, м;

$m_{пр}$ – приведенная масса газа или пара, кг.

Приведенная масса $m_{пр}$ определяется по формуле

$$m_{пр} = m \frac{Q_{гор}}{4,52} Z, \quad (7.6)$$

где m – масса горючих газов и (или) паров, поступивших в результате аварии в окружающее пространство, кг;

$Q_{гор}$ – удельная теплота сгорания, МДж/кг;

Z – коэффициент участия горючего в горении, который допускается принимать равным 0,1.

Детерминированные критерии значения параметра избыточного давления, при котором наблюдается тот или иной уровень поражения людей, представлены в табл. 7.2.

Таблица 7.2. Степень опасности воздействия избыточного давления [3]

Степень поражения	Избыточное давление, кПа
Полное разрушение зданий, обрушение зданий	100
50-процентное разрушение несущих и перекрытий зданий	53
Средние повреждения зданий	28
Умеренные повреждения зданий (повреждение внутренних перегородок, рам, дверей и т. п.)	12
Нижний порог повреждения человека волной давления	5
Малые повреждения (разбита часть остекления)	3

Задание

Выбрать вещество из ниже приведенного перечня горючих веществ согласно порядковому номеру в списке обучающихся и решить последовательно следующие задания.

1. При аварийной разгерметизации аппарата в помещении объемом $V = 200 \text{ м}^3$ поступает 20 кг индивидуального горючего вещества и полностью испаряется. Определить избыточное давление в помещении, развиваемое при

сгорании смеси горючего с воздухом, возникающее при аварийной разгерметизации аппарата в производственном помещении. Максимально возможная температура для данной климатической зоны $t_p = 36 \text{ }^\circ\text{C}$ [12]. Максимальное t давление неизвестно. Определить категорию или степень поражения здания и человека.

2. Рассчитать размеры пожароопасной зоны, ограниченной НКПР горючих паров при полном испарении жидкости, перевозимой автотранспортом, в количестве 5 тонн. Температура окружающей среды $28 \text{ }^\circ\text{C}$, давление 740 мм рт. ст.

3. Рассчитать степень поражения людей от ожогов на расстоянии 30, 50 и 100 метров от геометрического центра паровоздушного облака паров жидкости из п. 2 в случае его взрыва.

Перечень горючих веществ для расчетного задания:

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1) гептан; | 14) бутиловый спирт; |
| 2) декан; | 15) окись этилена; |
| 3) 1, 4-диоксан; | 16) изопропилбензол; |
| 4) тетрагидрофуран; | 17) диэтиловый эфир; |
| 5) циклопропан; | 18) этилацетат; |
| 6) гексан; | 19) амилацетат; |
| 7) бензол; | 20) анилин; |
| 8) толуол; | 21) метилацетат; |
| 9) м-ксилол; | 22) циклогексан; |
| 10) о-ксилол; | 23) метиловый спирт; |
| 11) изобутан; | 24) метилциклогексан; |
| 12) этиловый спирт; | 25) этилциклопентан; |
| 13) пропиловый спирт; | 26) амиловый спирт. |

Требования к отчету

Выполнить задание в соответствии с технологией выполнения работы. Полученные результаты представить в виде отчета. Шрифт текста Times New Roman, размер шрифта 14, межстрочный интервал 1,5, абзацный отступ 1 см.

Технология выполнения работы

Изучить содержание практической работы № 3 по дисциплине «Теория горения и взрыва» [13].

Выбрать вещество из нижеприведенного перечня горючих веществ согласно порядковому номеру в списке обучающихся и последовательно решить следующие задания.

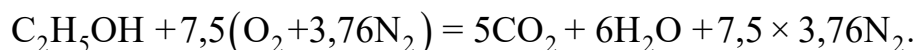
Пример.

Горючее вещество для расчетного задания: этиловый спирт.

1. При аварийной разгерметизации аппарата в помещение объемом $V = 200 \text{ м}^3$ поступает 20 кг горючего вещества. Определить избыточное давление в помещении, развиваемое при сгорании смеси горючего с воздухом, возникающее при аварийной разгерметизации аппарата в производственном помещении. Максимально возможная температура для данной климатической зоны $t_p = 36 \text{ °C}$ [12]. Максимальное давление неизвестно. Определить категорию или степень поражения здания и человека.

Решение.

Записываем уравнение реакции горения этилового спирта:



Стехиометрический коэффициент кислорода в реакции сгорания амилового спирта равен $\beta = 7,5$.

Стехиометрическая концентрация паров амилового спирта в воздухе составит

$$C_{\text{ст}} = \frac{100}{1 + 4,84\beta} = \frac{100}{1 + 4,84 \cdot 7,5} = 2,68 \text{ \%}.$$

Плотность паров амилового спирта при расчетной температуре t_p равна

$$\rho_n = \frac{M}{V_0 \times (1 + 0,00367t_p)} = \frac{46}{22,413 \times (1 + 0,00367 \cdot 36)} = 1,82 \text{ кг/м}^3.$$

Тогда избыточное давление при сгорании амилового спирта для расчетной аварии согласно формуле составит (поскольку максимальное давление неизвестно, принимаем $p_{\max} = 900$ кПа)

$$\Delta p = (p_{\max} - p_0) \frac{m \cdot Z}{V_{\text{св}} \rho_n} \cdot \frac{100}{C_{\text{ст}}} \cdot \frac{1}{K_H} = (900 - 101) \cdot \frac{20 \cdot 0,3}{200 \cdot 1,82} \cdot \frac{100}{2,68} \cdot \frac{1}{3} = 163,8 \text{ кПа.}$$

Ответ: избыточное давление почти 164 кПа. Следовательно, в случае аварии будет полное разрушение здания и смертельное воздействие на человека.

2. Рассчитать размеры пожароопасной зоны, ограниченной НКПР горючих паров при полном испарении жидкости, перевозимой автотранспортом в количестве 5 тонн. Температура окружающей среды 37 °С, давление 740 мм рт. ст.

Решение.

НКПР этилового спирта (см. решение в практической работе № 5):

$$\text{НКПР}(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 3,38 \text{ \%}.$$

Радиус НКПР для паров ЛВЖ:

$$R_{\text{нкпр}} = 7,8 \cdot \left(\frac{m}{\rho_{\text{п}} \cdot C_{\text{нкпр}}} \right)^{0,33} = 7,8 \cdot \left(\frac{5000}{1,808 \cdot 3,38} \right)^{0,33} = 71,3 \text{ м};$$

$$R_{\text{нкпр}} = \frac{M}{V_0(1 + 0,00367t_p)} = \frac{46}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 37)} = 1,808 \text{ кг/м}^3.$$

Высота для паров ЛВЖ:

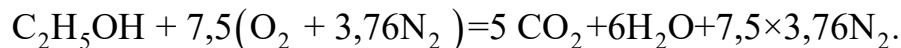
$$Z_{\text{нкпр}} = 0,26 \left(\frac{m}{\rho_{\text{п}} \cdot C_{\text{нкпр}}} \right)^{0,33} = 0,26 \left(\frac{5000}{1,808 \cdot 3,38} \right)^{0,33} = 2,4 \text{ м}.$$

Ответ: радиус пожароопасной зоны 71,3 м, а высота 2,4 м.

3. Рассчитать степень поражения людей на расстоянии 30, 50 и 100 метров от геометрического центра паровоздушного облака паров жидкости из п. 2 в случае его взрыва.

Решение.

Записываем уравнение реакции горения этилового спирта:



Энтальпии образования простых веществ – $\Delta H^0(\text{O}_2)$ и $\Delta H^0(\text{N}_2)$ – в стандартных условиях приняты равными 0. Находим энтальпии образования по таблице в приложении:

$$\Delta H^0(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = -234 \text{ кДж/моль};$$

$$\Delta H^0(\text{H}_2\text{O}) = -241,8 \text{ кДж/моль};$$

$$\Delta H^0(\text{CO}_2) = -393,5 \text{ кДж/моль}.$$

Соответственно, низшая теплота горения равна:

$$Q_{\text{н.гор}} = \Delta H^0_{\text{реакции}} = -234 + 2 \cdot 393,5 + 3 \cdot 241,8 = 1\,278,4 \text{ кДж/моль}.$$

Так как 1 моль весит 46 грамм, то составим пропорцию:

$$46 \text{ гр}(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) \equiv 1 \text{ моль} \rightarrow 1\,278,4 \text{ кДж (выделяется тепла при горении)};$$

$$1 \text{ кг} = 1\,000 \text{ гр} \rightarrow X \text{ кДж};$$

$$X = Q_{\text{н.гор}} = 1\,278,4 \cdot 1\,000 / 46 = 27\,791 \text{ кДж/кг} = 27,8 \text{ МДж/кг}.$$

Приведенная масса:

$$m_{\text{пр}} = m \frac{Q_{\text{гор}}}{4,52} Z = 5\,000 \times \frac{27,8}{4,52} \times 0,1 = 3\,075 \text{ кг}.$$

Избыточное давление на расстоянии 100 м от геометрического центра:

$$P = P_0 \left(0,8 \cdot \frac{m_{\text{пр}}^{0,33}}{r} + 3 \cdot \frac{m_{\text{пр}}^{0,66}}{r^2} + 5 \cdot \frac{m_{\text{пр}}}{r^3} \right) =$$
$$= 101 \cdot \left(0,8 \cdot \frac{3\,075^{0,33}}{100} + 3 \cdot \frac{3\,075^{0,66}}{100^2} + 5 \cdot \frac{3\,075}{100^3} \right) = 19,06 \text{ кПа}.$$

Избыточное давление на расстоянии 50 м от геометрического центра:

$$\Delta P = 101 \cdot \left(0,8 \cdot \frac{3\,075^{0,33}}{50} + 3 \cdot \frac{3\,075^{0,66}}{50^2} + 5 \cdot \frac{3\,075}{50^3} \right) = 59,59 \text{ кПа.}$$

Избыточное давление на расстоянии 30 м от геометрического центра:

$$\Delta P = 101 \cdot \left(0,8 \cdot \frac{3\,075^{0,33}}{30} + 3 \cdot \frac{3\,075^{0,66}}{30^2} + 5 \cdot \frac{3\,075}{30^3} \right) = 163,12 \text{ кПа.}$$

Ответ: на расстоянии 100 м от ударной волны 19,06 кПа – воздействие скоростного напора – приводит к отбрасыванию людей на расстояние в несколько метров, что вызывает травмы.

На расстоянии 50 м от ударной волны 59,59 кПа наступают средние поражения (контузия головного мозга, множественные вывихи, потеря слуха).

На расстоянии 30 м от ударной волны 163,12 кПа возникают крайне тяжелые поражения, которые, как правило, заканчиваются смертью. Они сопровождаются разрывами внутренних органов и сосудов, наполненных кровью (или другими жидкостями) или газом.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение взрыва.
2. Какие ситуации относятся к взрывопожароопасным?
3. Какие ситуации не относятся к взрывопожароопасным?
4. Перечислите поражающие факторы взрыва.
5. Перечислите поражающие факторы пожара.

Практическая работа № 8

РАСЧЕТ КРИТЕРИЕВ ВЗРЫВОПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ

Цель работы: закрепить умения расчета детерминированных показателей взрывопожарной опасности и определения категории помещений по взрывопожарной опасности.

Время выполнения: 6 часов (2 часа – аудиторная работа, 4 часа – самостоятельная).

Задачи работы

1. Ознакомиться с общими теоретическими сведениями.
2. Выполнить расчетное задание согласно рекомендациям, изложенным в теоретической части практической работы, используя справочные таблицы и нормативные документы.
3. Письменно ответить на контрольные вопросы.
4. Оформить результаты в виде отчета согласно требованиям.

Перечень обеспечивающих средств: компьютерное и мультимедийное оборудование, установленное в аудитории, нормативно-правовая документация.

Общие теоретические сведения

Перед тем как выбрать средства защиты и спрогнозировать пожароопасную ситуацию, необходимо определить категорию и класс пожароопасности сооружения на производственном объекте. Расчет последствий возможных аварийных ситуаций для выполнения обязательных требований пожарной безопасности и выбора системы противопожарной защиты объекта осуществляют на стадиях проектирования зданий и реконструкции. Ответственному за пожарную безопасность необходимо следить за внедрениями и «рационализаторскими» предложениями, в результате которых может измениться категория помещения.

Категории помещений и зданий предприятий и учреждений, а также сооружений определяются в соответствии с положениями ФЗ-123 «Технического регламента о требованиях пожарной безопасности» [1]. Прежде всего это касается оценки опасности при возникновении пожара в технологических процессах от удельной пожарной нагрузки. Сведения об удельной пожарной нагрузке в зависимости от категории помещения приведены в табл. 8.1. Методика определения подробно описана в официальном документе «Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 12.3.047–2012 „Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля”» [3].

Различают два комплекса объектов:

- производственные здания и сооружения, складские помещения, производственные участки;
- наружные технологические установки (комплекс аппаратов и технологического оборудования, расположенного вне зданий, сооружений и строений).

Таблица 8.1. Сведения об удельной пожарной нагрузке и способах размещения для категорий помещений В1–В4 по ГОСТ Р 12.3.047 [3]

Категория помещения	Удельная пожарная нагрузка g на участке	Способ размещения
В1	Более 2 200 МДж/м ²	Не нормируется
В2	1401–2 200 МДж/м ²	В соответствии с Б.2
В3	181–1 400 МДж/м ²	В соответствии с Б.2
В4	1–180 МДж/м ²	На любом участке пола помещения, площадь каждого из участков пожарной нагрузки не более 10 м ² . Способ размещения участков пожарной нагрузки определяется согласно Б.2

В своде правил (приложение Б СП 12.13130.2009) [4] имеются дополнительные условия при определении категории – минимальное расстояние от поверхности пожарной нагрузки до нижнего пояса ферм перекрытия. Этот случай рассматривается в курсе «Пожарная безопасность».

Задание

В соответствии со своим номером в списке обучающихся решить 2 задачи, выбрав в задании 1 вещество, а в задании 2 – вариант из таблицы.

I. При аварийной разгерметизации аппарата в помещении объемом $V = 200 \text{ м}^3$ поступает 5 кг горючего вещества. Определить избыточное давление в помещении, развиваемое при сгорании смеси горючего с воздухом, возникающее при аварийной разгерметизации аппарата в производственном помещении. Максимально возможная температура для данной климатической зоны $t_p = 36 \text{ °C}$ [12]. Максимальное давление неизвестно. Определить категорию или степень поражения здания и человека:

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1) гептан; | 14) бутиловый спирт; |
| 2) декан; | 15) окись этилена; |
| 3) 1,4-диоксан; | 16) изопропилбензол; |
| 4) тетрагидрофуран; | 17) диэтиловый эфир; |
| 5) циклопропан; | 18) этилацетат; |
| 6) гексан; | 19) амилацетат; |
| 7) бензол; | 20) анилин; |
| 8) толуол; | 21) метилацетат; |
| 9) м-ксилол; | 22) циклогексан; |
| 10) о-ксилол; | 23) метиловый спирт; |
| 11) изобутан; | 24) метилциклогексан; |
| 12) этиловый спирт; | 25) этилциклопентан; |
| 13) пропиловый спирт; | 26) амиловый спирт. |

II. Выбрать вариант из таблицы и определить категорию помещения, если количество масла АМТ–300 (ТУ 38–1Г–68) в одном из компрессоров (имеющем наибольшее количество масла) составляет M кг. Согласно технологическим условиям площадь размещения пожарной нагрузки будет составлять $S \text{ м}^2$.

Номер варианта	Масса M , кг	Площадь S , м ²
1	240	4
2	370	6
3	500	8
4	630	10
5	760	12
6	890	14
7	1 020	16
8	1 150	18
9	1 280	20
10	1 410	22
11	1 540	24
12	1 670	26
13	1 800	28
14	1 930	30
15	2 060	31
16	2 190	32
17	2 320	33
18	2 450	34
19	2 580	35
20	2 710	36
21	2 840	37
22	2 970	38
23	2 715	38
24	1 360	24
25	1 760	24
26	1 560	24
27	2 015	38

Требования к отчету

Выполнить задание в соответствии с технологией выполнения работы. Полученные результаты представить в виде отчета. Шрифт текста Times New Roman, размер шрифта 14, межстрочный интервал 1,5, абзацный отступ 1 см.

Технология выполнения работы

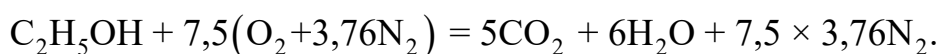
1. Изучить содержание главы 3 учебно-методического пособия по дисциплине «Теория горения и взрыва».
2. Выбрать вещество из приведенного перечня горючих веществ согласно порядковому номеру в списке обучающихся.

3. Решить задание с использованием данных из таблиц П.7, П.8, П.10 и П.11 приложения.

I. При аварийной разгерметизации аппарата в помещение объемом $V = 200 \text{ м}^3$ поступает 20 кг горючего вещества. Определить избыточное давление в помещении, развиваемое при сгорании смеси горючего с воздухом, возникающее при аварийной разгерметизации аппарата в производственном помещении. Максимально возможная температура для данной климатической зоны $t_p = 36 \text{ °C}$ [12]. Максимальное давление неизвестно. Определить категорию или степень поражения здания и человека.

Горючее вещество для расчетного задания: амиловый спирт.

Решение. Записываем уравнение реакции горения амилового спирта:



Стехиометрический коэффициент кислорода в реакции сгорания амилового спирта равен $\beta = 7,5$.

Стехиометрическая концентрация паров амилового спирта в воздухе составит

$$C_{\text{ст}} = \frac{100}{1 + 4,84\beta} = \frac{100}{1 + 4,84 \cdot 7,5} = 2,68 \text{ \%}.$$

Плотность паров амилового спирта при расчетной температуре t_p равна

$$\rho_{\text{п}} = \frac{M}{V_0(1 + 0,00367t_p)} = \frac{88}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 36)} = 3,47 \text{ кг/м}^3.$$

Тогда избыточное давление при сгорании амилового спирта для расчетной аварии, согласно формуле (7.1), составит (поскольку максимальное давление неизвестно, принимаем $p_{\text{max}} = 900 \text{ кПа}$):

$$\Delta p = (p_{\text{max}} - p_0) \frac{m \cdot Z}{V_{\text{св}} \rho_{\text{п}}} \cdot \frac{100}{C_{\text{ст}}} \cdot \frac{1}{K_{\text{н}}} = (900 - 101) \cdot \frac{20 \cdot 0,3}{200 \cdot 3,47} \cdot \frac{100}{2,68} \cdot \frac{1}{3} = 86 \text{ кПа}.$$

Ответ: избыточное давление – 86 кПа, что превышает 5кПа, а температура вспышки более 28 °С, следовательно, категория помещения – Б-взрывопожароопасность, разрушение здания в случае аварии составит больше 50 %. Воздействие на человека – тяжелые повреждения, требующие госпитализации.

II. Выбрать вариант из таблицы и определить категорию помещения, если количество масла АМТ–300 (ТУ 38–1Г–68) в одном из компрессоров (имеющем наибольшее количество масла) составляет M кг. Согласно технологическим условиям площадь размещения пожарной нагрузки будет составлять S м²:

Номер варианта	Масса M , кг	Площадь S , м ²
12	1 670	26

Решение. В соответствии с приложением Б СП 12.13130.2009 [4] пожарная нагрузка будет равна

$$Q = 1\,670 \times 41,87 = 69\,923 \text{ МДж.}$$

Согласно технологическим условиям площадь размещения пожарной нагрузки будет составлять 26 м² в соответствии с СП12.13130.2009 [4]; принимаем площадь размещения пожарной нагрузки $S = 26$ м². Удельная пожарная нагрузка составит

$$g = Q / S = 69\,923 / 26 = 2\,689,3 \text{ МДж} \times \text{м}^{-2} > 2\,200.$$

Ответ: поскольку $2\,689,4 > 2\,200$ МДж/м², то в соответствии с табл. 8.1 помещения с данной удельной пожарной нагрузкой могут быть отнесены к категории В1.

Контрольные вопросы

1. Какие официальные документы определяют категорию и класс пожароопасности объектов?
2. Как проводят оценку опасности возникновения пожара и путей его распространения?
3. Назовите детерминированные критические показатели, по которым разделяют категории помещений.
4. Что такое горючая нагрузка, пожарная нагрузка, технологическая установка?
5. Что такое размер зоны, какие параметры используются для оценки опасности?

Практическая работа № 9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВОПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ПЫЛИ

Цель работы: освоение методов расчета основных показателей взрывопожарной опасности горючей пыли для определения степени опасности воздействия взрыва на человека, здания и расчета категории помещений.

Время выполнения: 6 часов (2 часа – аудиторная работа, 4 – самостоятельная).

Задачи работы

1. Ознакомиться с общими теоретическими сведениями.
2. Выполнить расчетное задание согласно рекомендациям, изложенным в теоретической части практической работы, используя справочные таблицы и нормативные документы.
3. Письменно ответить на контрольные вопросы.
4. Оформить результаты в виде отчета согласно требованиям.

Перечень обеспечивающих средств: компьютерное и мультимедийное оборудование, установленное в аудитории, нормативно-правовая документация.

Общие теоретические сведения

Современные системы размельчения твердых веществ, называемые системами помола, обеспечивают высокую степень измельчения. В зависимости от технологического назначения получаемый порошок может иметь размеры от нескольких миллиметров до десятков нанометров и способен взрываться и гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха и другими веществами. Если рабочие температуры в помольных камерах мельниц с мелющими телами превысят предельно допустимые, возможен пожар и взрыв. В техническом регламенте о требованиях пожарной безо-

пасности ФЗ-123, ст. 18, помещения, в которых выделяются горючие пыли или волокна, относят к пожароопасной зоне класса П-II [1].

Горючая пыль – дисперсная система, состоящая из твердых частиц размером менее 850 мкм, находящихся во взвешенном или осевшем состоянии, способная к самостоятельному горению в воздухе. Горючая пыль способна воспламеняться под воздействием внешних источников воспламенения и может продолжать гореть при окружающей температуре, однако самовоспламеняться самопроизвольно она может только под воздействием температуры, превышающей ее температуру самовоспламенения.

Основные показатели опасности пыли (кроме взрывчатых и радиоактивных веществ) установлены ГОСТ 12.1.041–83 (приложение, табл. П.14) и в [10, 11]. В табл. 9.1 приведены экспериментальные значения НКПР некоторых распространенных взрывоопасных пылей [11].

Таблица 9.1. Нижний концентрационный предел распространения пламени в пылевоздушной смеси [11]

Но- мер	Тип пыли	НКПР, г/м ³	Номер	Тип пыли	НКПР, г/м ³
1	Сера	2,3	13	Молоко сухое	7,6
2	Пыль льняной костры	16,7	14	Сланцевая пыль	58
3	Нафталин	2,5	15	Сахар свеклович- ный	8,9
4	Горох	25,2	16	Камфора	10,1
5	Канифоль	5,0	17	Пыль мельничная серая	10,1
6	Жом свекловичный	27,7	18	Мясокостная мука	10,1
7	Сухие сливки с сахаром	6,3	19	Уротропин	15,0
8	Казеин технический	32,8	20	Шеллак	15,0
9	Шрот подсолнечный	7,6	21	Табачная пыль	68,0÷101,0
10	Крахмал картофельный	40,3	22	Элеваторная пыль	250÷277
11	Эбонитовая пыль	7,6	23	Угольные высоко- зольные пыли	114÷400
12	Чайная пыль	32,8	24	Древесные опилки	65,5

Следует помнить, что пыль при концентрации близкой к НКПР, не взрывается. Однако при этом может возникнуть хлопок, который поднимет отложившуюся пыль в воздух и вызовет вторичное горение или взрыв.

Задание

При аварийной разгерметизации аппарата в одноэтажном кирпичном помещении поступает m кг горючей пыли, дисперсностью на 90 % меньше критического. Определить избыточное давление в помещении, развиваемое при сгорании смеси горючего с воздухом, возникающее при аварийной разгерметизации аппарата в производственном помещении. При обосновании расчетного варианта аварии пренебречь пылеотложениями на полу, стенах и других поверхностях. Атмосферное давление 1 атм. Выбрать из табл. 9.2 вариант расчетного задания согласно номеру в списке обучающихся и определить категорию помещения, степень поражения здания и человека.

Таблица 9.2. Исходные данные к расчетному заданию

Номер варианта	Размеры помещения, ширина/длина/ высота, м	Масса горючей пыли в таре, m , кг	Тип пыли (номер из табл. 9.1)	Температура в помещении, °С
1.	6/20/2	20	1	20
2.	6,5/20/2	20,5	2	21
3.	7/20/2	21	3	22
4.	7,5/20/2	21,5	4	23
5.	8/20/2	22	5	24
6.	8,5/20/2	22,5	6	25
7.	9/20/2	23	7	26
8.	9,5/20/2	23,5	8	27
9.	10,5/20/2	24,5	10	29
10.	10/20/2	24	9	28
11.	11/20/2	25	11	30
12.	11,5/20/2	25,5	12	31
13.	12/20/2	26	13	32
14.	12,5/20/2	26,5	1	20

Окончание табл. 9.2

Номер варианта	Размеры помещения, ширина/длина/ высота, м	Масса горючей пыли в таре, <i>m</i> , кг	Тип пыли (номер из табл. 9.1)	Температура в помещении, °С
15.	13/20/2	27	2	21
16.	13,5/20/2	27,5	3	22
17.	14/20/2	28	4	23
18.	14,5/20/2	28,5	5	24
19.	15/20/2	29	6	25
20.	15,5/20/2	29,5	7	26
21.	16/20/2	30	8	27
22.	16,5/20/2	30,5	9	28
23.	17/20/2	31	10	29

Требования к отчету

Выполнить задание в соответствии с технологией выполнения работы. Полученные результаты представить в виде отчета. Шрифт текста Times New Roman, размер шрифта 14, межстрочный интервал 1,5, абзацный отступ 1 см.

Технология выполнения работы

1. Изучить практическую работу № 3 по дисциплине «Теория горения и взрыва» [13].

2. Выбрать вещество из приведенного перечня горючих веществ согласно порядковому номеру в списке обучающихся и решить последовательно следующее задание.

3. Используя данные из таблицы П.14 приложения, решить следующее задание.

При аварийной разгерметизации аппарата в одноэтажном кирпичном помещении поступает *m* кг горючей пыли. Определить избыточное давление в помещении, развиваемое при сгорании смеси горючего с воздухом, возникающее при аварийной разгерметизации аппарата в производственном помещении. При обосновании расчетного варианта аварии пренебречь пылеотложениями на полу, стенах и других поверхностях. Атмосферное

давление 1 атм. Выбрать вариант расчетного задания согласно номеру в списке обучающихся и определить категорию помещения, степень поражения здания и человека.

Исходные данные к расчетному заданию

Номер варианта	Размеры помещения, ширина/длина/ высота, м	Масса горючей пыли в таре, кг	Тип пыли (номер из табл. 9.1)	Температура в помещении, °С
12.	11,5/20/2	25,5	12	31

Тип пыли: чайная пыль. НКПР чайной пыли 32,8 г/м³.

Решение. Свободный объем помещения составляет

$$V_{\text{св}} = 0,8 \cdot 11,5 \cdot 20 \cdot 2 = 368 \text{ м}^3.$$

Теплоту сгорания находим из формулы НКПР:

$$\text{НКПР} = \frac{800}{Q_{\text{гор}}} \rightarrow Q_{\text{гор}} = \frac{800}{\text{НКПР}} = \frac{800}{32,8} = 24,39 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} = 24\,390 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Плотность воздуха

$$\rho_{\text{п}} = \frac{M}{V_0(1+\alpha \cdot t_p)} = \frac{29}{22,413 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 31)} = 1,16 \text{ кг/м}^3.$$

Коэффициент участия пыли во взрыве Z рассчитывается по формуле

$$Z = 0,5 \cdot F = 0,5 \cdot 0,1 = 0,05.$$

Расчет избыточного давления взрыва ΔP :

$$\Delta P = \frac{m \cdot Q_{\text{гор}} \cdot P_0 \cdot Z}{V_{\text{св}} \cdot \rho_{\text{воз}} \cdot C_p \cdot T_0} \cdot \frac{1}{K_H} = \frac{25,5 \cdot 24\,390 \cdot 101 \cdot 0,05}{368 \cdot 1,16 \cdot 1,01 \cdot 304,15} \cdot \frac{1}{3} = 7,98 \text{ кПа}.$$

Ответ: расчетное избыточное давление взрыва ΔP превышает 5 кПа, следовательно, складское помещение чайного цеха относится к категории Б. Влияние на персонал: неприятное ощущение без потери трудоспособности. Степень разрушения здания слабая.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение пыли.
2. Дайте определение горючей пыли.
3. Перечислите показатели пожаровзрывоопасности.
4. Какие процессы приводят к воспламенению и взрыву в технологическом оборудовании?

Практическая работа № 10
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВЕ
РЕЗЕРВУАРА С ПЕРЕГРЕТОЙ ЖИДКОСТЬЮ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕГО ОЧАГА ПОЖАРА

Цель работы: приобрести навык расчета параметров опасности взрыва при перегреве резервуара с жидкостью.

Время выполнения: 4 часа (2 часа – аудиторная работа, 2 часа – самостоятельная).

Задачи работы

1. Ознакомиться с общими теоретическими сведениями.
2. Выполнить расчетное задание согласно рекомендациям, изложенным в теоретической части практической работы, используя справочные таблицы и нормативные документы.
3. Письменно ответить на контрольные вопросы.
4. Оформить результаты в виде отчета согласно требованиям.

Перечень обеспечивающих средств: компьютерное и мультимедийное оборудование, установленное в аудитории, нормативно-правовая документация.

Общие теоретические сведения

При попадании замкнутого резервуара со сжиженным газом (СУГ) с легковоспламеняющейся (ЛВЖ) или горючей (ГЖ) жидкостью в очаг пожара может происходить нагрев содержимого резервуара до температуры, существенно превышающей нормальную температуру кипения, с соответствующим повышением давления. За счет нагрева стенки сосуда теряют прочность, если они не смачиваются. При определенных условиях возможен разрыв резервуара с возникновением волн сжатия, характеристики которых установлены в ГОСТ Р 12.3.047–2012, приложение Ж. Вероятность

возникновения волн сжатия определяется с помощью специального коэффициента δ по формуле

$$\delta = \frac{c_p(T - T_{\text{кип}})}{L}, \quad (10.1)$$

где c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении жидкой фазы, Дж/(кг К) (допускается принимать равной 2 000 Дж/(кг К));

T – температура жидкой фазы, соответствующая температуре насыщенного пара при давлении срабатывания предохранительного клапана, К;

$T_{\text{кип}}$ – температура кипения вещества, К;

L – удельная теплота испарения при нормальной температуре кипения, Дж/кг. Приблизительное значение для горючих жидкостей $0,5 \pm 0,3$ МДж/кг.

Существуют две возможности развития аварии:

– если $\delta < 0,35$, то возникновение волн сжатия не ожидается;

– если $\delta \geq 0,35$, вероятность возникновения ударной волны велика.

При $\delta \geq 0,35$ избыточное давление и импульс в волне давления, образующиеся при взрыве резервуара с перегретой ЛВЖ, ГЖ или сжиженным углеводородным газом в очаге пожара, определяются по формулам:

$$\Delta P = P_0 \cdot \left(0,8 \cdot \frac{m_{\text{пр}}^{0,33}}{r} + 3 \cdot \frac{m_{\text{пр}}^{0,66}}{r^2} + 5 \cdot \frac{m_{\text{пр}}}{r^3} \right), \quad (10.2)$$

$$I^+ = 123 \cdot \frac{m_{\text{пр}}^{0,66}}{r}, \quad (10.3)$$

$$m_{\text{пр}} = \left(\frac{E_{\text{eff}}}{4,52} \right) \cdot 10^{-6}, \quad (10.4)$$

$$E_{\text{eff}} = k \cdot c_p \cdot m(T - T_{\text{кип}}), \quad (10.5)$$

где P_0 – атмосферное давление, кПа (допускается принимать равным 101 кПа);

r – расстояние от центра резервуара до объекта, подвергающегося воздействию волн сжатия;

$m_{\text{пр}}$ – приведенная масса (к тротиловому эквиваленту), кг;

k – доля энергии волны давления (допускается принимать равной 0,5);

m – масса ЛВЖ, ГЖ или СУГ, содержащаяся в резервуаре, кг;

c_p – удельная теплоемкость жидкой фазы, Дж/кг К (допускается принимать равной 2 000 Дж/кг К);

$T_{\text{кип}}$ – температура кипения при нормальном давлении $P_{\text{атм}} = 1$ атм, К;

E_{eff} – эффективная энергия взрыва, выраженная в Дж;

4,52 – это коэффициент, напрямую связанный с энергией взрыва тротила, равной $4,52 \times 10^6$ Дж/кг.

Температура кипения определяется из табл. П.15 приложения или по формуле ($P_{\text{атм}} = 1$ атм или 101 кПа)

$$T_{\text{кип}} = \frac{B}{A - \lg P_{\text{атм}}} - C_A + 273,15. \quad (10.6)$$

При наличии в резервуаре предохранительного устройства (клапана или мембраны) величина T определяется по формуле

$$T = \frac{B}{A - \lg P_{\text{пред}}} - C_A + 273,15, \quad (10.7)$$

где $P_{\text{пред}}$ – давление срабатывания предохранительного устройства, кПа; A , B , C_A – константы уравнения зависимости давления насыщенных паров жидкости от температуры (константы Антуана), определяемые по справочной литературе.

Примечание. Нормативные показатели из ГОСТ Р 53258–2019:

– коэффициент запаса прочности баллона 2,4÷3,0 (отношение давления разрушения баллона к рабочему давлению);

– баллон должен сохранять герметичность, целостность наружной поверхности и надписей на ней после пребывания в среде с температурой $(200 \pm \pm 20)$ °С в течение (60 ± 1) с;

– баллон должен сохранять прочность, герметичность, целостность наружной поверхности и надписей на ней после воздействия открытого пламени с температурой (800 ± 50) °С в течение (15 ± 1) с.

Задание

В зоне пожара находится цистерна под давлением. Определить температуру срабатывания клапана и избыточное давление, а также степень поражения

человека на расстоянии 30, 50 и 100 метров, развиваемое при взрыве цистерны. Вариант исходных данных выбрать из табл. 10.1 согласно номеру в списке обучающихся. Считать $\delta \geq 0,35$. Недостающие данные найти в приложении в табл. П.14.

Таблица 10.1. Исходные данные к расчетному заданию

Номер варианта	Масса вещества в цистерне, кг	Жидкость	Давление срабатывания клапана, $P_{пред}$, атм
1.	4 000	Ацетон	37
2.	4 150	Бензиловый спирт	36
3.	4 300	Бензол	35
4.	4 450	1, 3-бутадиен	34
5.	4 600	Н-бутан	33
6.	4 750	1-бутен	32
7.	4 900	2-бутен	31
8.	5 050	Н-бутилацетат	30
9.	5 200	втор-бутилацетат	29
10.	5 350	Н-бутиловый спирт	28
11.	5 500	Винилхлорид	27
12.	5 650	Н-октан	26
13.	5 800	Н-гексадекан	25
14.	5 950	Н-гексан	24
15.	6 100	М-ксилол	23
16.	6 250	Дивиниловый эфир	24
17.	6 400	N, n-диметилформамид	25
18.	6 550	1, 4-диоксан	26
19.	6 700	1, 2-дихлорэтан	27
20.	6 850	Диэтиламин	28
21.	7 000	Диэтиловый эфир	29
22.	7 150	Н-додекан	30
23.	7 100	Изобутан	31

Требования к отчету

Полученные результаты представить в виде отчета. Материал в отчете должен быть изложен четко, ясно, технически грамотным языком. В отчете необходимо представить аргументированно свое мнение о целесообразности проведения природоохранных мероприятий. Отчет выполняется в электронном виде и сдается преподавателю. Шрифт текста TimesNewRoman, размер шрифта 14, межстрочный интервал 1,5, абзацный отступ 1 см.

Технология выполнения работы

1. Изучить практическую работу № 3 по дисциплине «Теория горения и взрыва» [13].

2. Выбрать вещество из приведенного перечня горючих веществ согласно порядковому номеру в списке обучающихся и решить последовательно следующее задание.

В зоне пожара находится цистерна под давлением. Определить температуру срабатывания клапана и избыточное давление, а также степень поражения человека на расстоянии 30, 50 и 100 метров, развиваемое при взрыве цистерны. Вариант исходных данных выбрать из табл. 10.1 согласно номеру в списке обучающихся. Считать значение показателя $\delta \geq 0,35$.

Вариант 29: $m - 6\ 100$ кг, $P_{\text{пред}} - 23$ атм, жидкость – декан:

Номер варианта	Масса вещества в цистерне, кг	Жидкость	Давление срабатывания клапана, $P_{\text{пред}}$, атм
29.	6 100	Декан	23

Решение. Рассчитаем температуру, при которой срабатывает предохранительный клапан:

$$T = \frac{B}{A - \lg P_{\text{пред}}} - C_A + 273,15 = \frac{1\ 809,975}{6,52023 - \lg(23 \cdot 101)} = -227,700 + 273,15 = 609\ \text{K}.$$

Оценим значение эффективной энергии взрыва:

$$E_{\text{eff}} = k \cdot c_p \cdot m \cdot (T - T_{\text{кип}}) = k \cdot c_p \cdot m \cdot \left(\frac{B}{A - \lg P_{\text{перед}}} - \frac{B}{A - \lg P_{\text{атм}}} \right),$$

где k – доля энергии волны давления (допускается принимать равной 0,5);

$m = 6 \cdot 100$ кг;

c_p – удельная теплоемкость жидкой фазы, Дж/кг К (допускается принимать равной 2000 Дж/кг К);

$$E_{\text{eff}} = 2 \cdot 10^9 \text{ Дж.}$$

Приведенная масса равна

$$m_{\text{пр}} = \left(\frac{E_{\text{eff}}}{4,52} \right) \cdot 10^{-6} = \left(\frac{2 \cdot 10^9}{4,52} \right) \cdot 10^{-6} = 442 \text{ кг.}$$

При $\delta \geq 0,35$ избыточное давление, образующееся при взрыве резервуара с перегретой ЛВЖ в очаге пожара, определяется по формуле

$$\Delta P = P_0 \cdot \left(0,8 \cdot \frac{m^{0,33}}{r} + 3 \cdot \frac{m^{0,66}}{r^2} + 5 \cdot \frac{m}{r^3} \right).$$

На расстоянии 30 м:

$$\Delta P = 101 \cdot \left(0,8 \cdot \frac{442^{0,33}}{30} + 3 \cdot \frac{442^{0,66}}{30^2} + 5 \cdot \frac{442}{30^3} \right) = 47 \text{ КПа.}$$

На расстоянии 50 м:

$$\Delta P = 101 \cdot \left(0,8 \cdot \frac{442^{0,33}}{50} + 3 \cdot \frac{442^{0,66}}{50^2} + 5 \cdot \frac{442}{50^3} \right) = 21 \text{ КПа.}$$

На расстоянии 100 м:

$$\Delta P = 101 \cdot \left(0,8 \cdot \frac{442^{0,33}}{100} + 3 \cdot \frac{442^{0,66}}{100^2} + 5 \cdot \frac{442}{100^3} \right) = 8 \text{ КПа.}$$

Ответ: на расстоянии 30 м давление ударной волны 47 кПа – среднее поражение, возможна контузия головного мозга, множественные вывихи, потеря сознания. На расстоянии 50 м давление ударной волны 21 кПа – легкое поражение, воздействие скоростного напора. Приведет к отбрасыванию людей на расстояния в несколько метров. Возможны травмы. На расстоянии 100 м давление ударной волны 8 кПа, человека задеть не должно.

Контрольные вопросы

1. Что такое очаг пожара?
2. В чем состоит опасность попадания резервуара с жидкостью в очаг пожара?
3. Что такое приведенная масса?
4. Дайте определение физического взрыва.

Практическая работа № 11

РАСЧЕТ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА НА ЧЕЛОВЕКА И ЗДАНИЯ

Цель работы: закрепить умение определять степень воздействия опасных факторов взрыва на человека и здания по методам, описанным в нормативных документах:

– ГОСТ Р 12.3.047–2012 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля»;

– СП 12.13130.2009 (утв. приказом МЧС РФ от 25 марта 2009 г. № 182) «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»;

– приказ МЧС РФ № 533 от 26.06.2024 взамен № 404 от 10.07.2009 «Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах»;

– дополнительно: «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств».

Время выполнения: 6 часов (2 часа – аудиторная работа, 4 часа – самостоятельная).

Задачи работы

1. Выполнить контрольное задание по оценке опасных факторов воздействия взрыва на человека и здания.

2. Ответить на теоретические контрольные вопросы.

3. Оформить результаты в виде отчета согласно требованиям.

Перечень обеспечивающих средств: компьютерное и мультимедийное оборудование, установленное в аудитории, нормативно-правовая документация.

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать размеры пожароопасной зоны, ограниченной НКПР горючих паров при полном испарении жидкости из расчетного задания (табл. 11.1), перевозимой в количестве 5 тонн. Температура окружающей среды 37 °С, давление 740 мм рт. ст.

2. Рассчитать степень поражения людей от взрыва паровоздушного облака из п. 1 на расстоянии 30, 50 и 100 м от геометрического центра.

3. Определить степень воздействия на кирпичный одноэтажный склад горючей жидкости при разгерметизации сосуда с 60 кг жидкости из расчетного задания (табл. 11.1), если температура в комнате хранения 25 °С. Размеры помещения: длина 60 м, ширина 20 м, высота 3 м. Давление 760 мм рт. ст. В помещении имеется вентиляция с кратностью 6, создающая движение воздушного потока в помещении.

4. Баллон с 100 кг горючей жидкости из расчетного задания (табл. 11.1) попал в зону пожара. Рабочее давление сосуда 25 атм. Определить вероятность возникновения волн сжатия и избыточное давление в случае их возникновения. Удельная теплота испарения горючих жидкостей $0,5 \pm 0,3$ МДж/кг.

Задание

Выбрать вещество из табл. 11.1 в соответствии со своим номером в списке обучающихся.

Решить задание согласно порядку выполнения работ.

Таблица 11.1. Исходные данные к расчетному заданию. Некоторые показатели пожаровзрывоопасности и пожарной опасности веществ и материалов

Продукт (ГОСТ, ТУ) (состав смеси), % (масс.)	Суммарная формула	Плотность жидкости, кг/л	Константы уравнения Антуана (размерность кПа)			Теплота сго- рания, МДж/кг
			А	В	СА	
Бензин авиационный Б-70 (ГОСТ 1012- 72)	$C_{7,267}H_{14,796}$	0,74	7,54424	2 629,65	384,195	44,1

Продолжение табл. 11.1

Продукт (ГОСТ, ТУ) (состав смеси), % (масс.)	Суммарная формула	Плотность жидкости, кг/л	Константы уравнения Антуана (размерность кПа)			Теплота сго- рания, МДж/кг
			А	В	С _А	
Бензин А–72 (зим- ний) (ГОСТ 2084– 67)	C _{6,991} H _{13,108}	0,76	4,19500	682,876	222,066	44,2
Бензин АИ–93 (лет- ний) (ГОСТ 2084– 67)	C _{7,024} H _{13,708}	0,71	4,12311	664,976	221,695	43,6
Бензин АИ–93 (зим- ний) (ГОСТ 2084– 67)	C _{6,911} H _{12,168}	0,73	4,26511	695,019	223,220	43,6
Дизельное топливо «З» (ГОСТ 305–73)	C _{12,343} H _{23,889}	0,85	5,07818	1 255,73	199,523	43,6
Дизельное топливо «Л» (ГОСТ 305–73)	C _{14,511} H _{29,120}	0,82	5,00109	1 314,04	192,473	43,4
Керосин осветитель- ный КО–20 (ГОСТ 4753–68)	C _{13,595} H _{26,860}	0,78	4,82177	1 211,73	194,677	43,7
Керосин осветитель- ный КО–22 (ГОСТ 4753–68)	C _{10,914} H _{21,832}	0,78	5,59599	1 394,72	204,260	43,7
Керосин осветитель- ный КО–25 (ГОСТ 4753–68)	C _{11,054} H _{21,752}	0,78	5,12496	1 223,85	203,341	43,7
Ксилол (смесь изо- меров) (ГОСТ 9410–60)	C ₈ H ₁₀	0,865	6,17972	1 478,16	220,535	43,2
Уайт-спирит (ГОСТ 3134–52)	C _{10,5} H _{21,0}	0,795	7,13623	2 218,3	273,15	44,0
Растворитель Р-4 (н-бутилацетат-12, толуол-62, ацетон- 26)	C _{5,452} H _{7,608} O _{0,535}	0,87	6,29685	1 373,667	242,828	40,9
Растворитель Р-4 (ксилол-15, толуол- 70, ацетон-15)	C _{6,231} H _{7,798} O _{0,223}	0,87	6,27853	1 415,199	244,752	43,2
Растворитель Р-5 (н-бутилацетат-30, ксилол-40, ацетон- 30)	C _{5,309} H _{8,655} O _{0,397}	0,87	6,30343	1 378,851	245,039	43,2
Растворитель Р-12 (н-бутилацетат-30, ксилол-10, толуол- 60)	C _{6,837} H _{9,217} O _{0,515}	0,87	6,17297	1 403,079	221,483	43,2

Окончание табл. 11.1

Продукт (ГОСТ, ТУ) (состав смеси), % (масс.)	Суммарная формула	Плотность жидкости, кг/л	Константы уравнения Антуана (размерность кПа)			Теплота сго- рания, МДж/кг
			А	В	СА	
Растворитель М (н-бутилацетат-30, этилацетат-5, этиловый спирт-60, изобутиловый спирт-5)	$C_{2,761}H_{7,147}O_{1,187}$	0,87	8,05697	2 083,566	267,735	36,7
Растворитель РМЛ (ТУКУ 467-56) (толуол-10, этиловый спирт-64, н-бутиловый спирт-10, этилцеллозольв-16)	$C_{2,645}H_{6,810}O_{1,038}$	0,87	8,69654	2 487,728	290,920	40,9
Растворитель РМЛ-218 (МРТУ 6-10-729-68)	$C_{4,791}H_{8,318}O_{0,974}$	0,87	7,20244	17 61,043	251,546	43,2
Растворитель РМЛ-315 (ТУ 6-10-1013-70)	$C_{5,962}H_{9,779}O_{0,845}$	0,8	6,83653	1 699,687	241,00	43,2
Хлорэтан	C_2H_5Cl	0,92	6,11140	1 030,007	238,612	19,4
Циклогексан	C_6H_{12}	0,78	5,96991	1 203,526	222,863	43,8
Этилацетат	$C_4H_8O_2$	0,9	6,22672	1 244,951	217,881	23,6
Этилбензол	C_8H_{10}	0,87	6,35879	1 590,660	229,581	41,3
Этиленгликоль	$C_2H_8O_2$	1,1	8,13754	2 753,183	252,009	19,3
Этиловый спирт	C_2H_6O	0,79	7,81158	1 918,508	252,125	30,6
Этилцеллозольв	$C_4H_{10}O_2$	0,93	7,86626	2 392,56	273,15	26,4

Требования к отчету

Выполнить задание в соответствии с технологией выполнения работы. Полученные результаты представить в виде отчета. Шрифт текста Times New Roman, размер шрифта 14, межстрочный интервал 1,5, абзацный отступ 1 см.

Технология выполнения работы

Изучить практическую работу № 3 по дисциплине «Теория горения и взрыва» [13].

Выбрать вещество из нижеприведенного перечня горючих веществ согласно порядковому номеру в списке обучающихся и решить последовательно все задания, используя формулы из предыдущих практических работ.

Например, уайт-спирит $C_{10,5}H_{21,0}$ (ГОСТ 3134–52):

Но- мер	Продукт (ГОСТ, ТУ) (состав смеси), % (масс.)	Суммарная формула	Плотность жидкости, кг/л	Константы уравнения Антуана (размерность кПа)			Теплота сгорания, МДж/кг
				А	В	СА	
00	Уайт–спирит (ГОСТ 3134–52)	$C_{10,5}H_{21,0}$	0,795	7,13623	2 218,3	273,15	44,0

Оценить размеры пожароопасной зоны, ограниченной НКПР, степень поражения людей и разрушения кирпичного одноэтажного склада.

Решение. НКПР уайт-спирит – 0,7 % (приложение, справочные таблицы, П.15).

Размеры пожароопасной зоны рассчитываются по формулам из практической работы № 7:

$$R_{\text{нкпр}} = 7,8 \cdot \left(\frac{m}{p \cdot C_{\text{нкпр}}} \right)^{0,33} = 7,8 \cdot \left(\frac{5\,000}{6,4 \cdot 0,7} \right)^{0,33} = 96,72 \text{ м};$$

$$\rho = \left(\frac{M}{V_0 (1 + 0,03)} \right)^{0,33} = \frac{147,28}{22,4 \cdot (1 + 0,0367 \cdot 0,7)} = 6,4 \text{ кг/м}^3;$$

$$Z_{\text{нкпр}} = 0,26 \cdot \left(\frac{m}{\rho \cdot C_{\text{нкпр}}} \right)^{0,33} = 0,26 \cdot \left(\frac{5\,000}{6,4 \cdot 0,7} \right)^{0,33} = 3,22 \text{ м}.$$

Ответ: радиус пожароопасной зоны 96,72 м, высота 3,22 м.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [Электронный ресурс] : федер. закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

2. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : Приказ МЧС РФ 533 от 26.06.2024. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

3. ГОСТ Р 12.3.047–2012. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «ГАРАНТ».

4. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (приказ МЧС России от 25.03.2009 № 182) [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «ГАРАНТ».

5. ГОСТ 30852.19–2002. Данные по горючим газам и парам, относящиеся к эксплуатации электрооборудования. – Введ. 2014–02–15. – М. : Стандартинформ, 2014. – 26 с.

6. ГОСТ 30852.11–2002. Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 12. Классификация смесей газов и паров с воздухом по безопасным экспериментальным максимальным зазорам и минимальным воспламеняющим токам. – Введ. 2014–02–15. – М. : Стандартинформ, 2014. – 16 с.

7. ГОСТ 31610.10–2012. Электрооборудование для взрывоопасных газовых сред. Часть 10. Классификация взрывоопасных зон. – Введ. 2014–02–15. – М. : Стандартинформ, 2014. – 51 с.

8. НПБ 23–2001. Пожарная опасность технологических сред. Номенклатура показателей. [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «ГАРАНТ».

9. ГОСТ 12.1.044–2018. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей

и методы их определения (с Поправкой, с Изменением № 1. – Введ. – 2019–05–01. – М. : Стандартиформ, 2014. – 211 с.

10. Баратов А. Н., Корольченко А. Я., Кравчук Г. И. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник. В 2-х кн. – М. : Химия, 1990. – 496 с., 384 с.

11. Баратов А. Н. Пожарная опасность. Взрывобезопасность : справочник / А. Н. Баратов, Е. Н. Иванов, А. Я. Корольченко, Г. И. Кравчук – М. : Химия, 1987. – 272 с.

12. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. – Введ. 2013–01–01. – М., 2015. – 120 с.

13. Чернов А. А., Татаренко В. И. Теория горения и взрыва : практикум. – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. – 104 с.

Справочные таблицы

Таблица П.1. Энтальпии образования в стандартных условиях (298 К, 25 °С, 1 атм) некоторых веществ из электронной базы NIST (<https://webbook.nist.gov/chemistry/form-ser/>).

Но- мер	Вещество	Энтальпия образова- ния ΔH_f° gas, кДж/моль	Первоисточник
1	CO ₂	-393,51 ± 0,13	Coxetal., 1984
2	H ₂ O	-241,83 ± 0,04	Coxetal., 1984
3	SO ₂	-296,81 ± 0,2	Coxetal., 1984
4	Окись углерода (CO)	-110,53	Chase, 1998
5	Аммиак (NH ₃)	-45,90	Chase, 1998
6	Метан (CH ₄)	-74,6 ± 0,3	Manion
7	Пропан (C ₃ H ₈)	-104,7 ± 0,50	PittamandPilcher, 1972
8	Этан (C ₂ H ₆)	-84 ± 0,4	Manion
9	Ацетилен (C ₂ H ₂)	227,4 ± 0,8	Manion
10	Этилен (C ₂ H ₄)	52,4 ± 0,5	Manion
11	Формальдегид (CH ₂ O)	-108,6 ± 0,46	Fletcher, Pilcher, 1970
12	Уксусная кислота (C ₂ H ₄ O ₂)	-433 ± 3	N/A
13	Толуол C ₆ H ₅ CH ₃	50,1 ± 1,1	Rouxetal., 2008
14	Бензол C ₆ H ₆	82,9 ± 0,9	Rouxetal., 2008
15	Метанол (CH ₃ OH)	-205 ± 10	N/A
16	Пропилен (CH ₂ =CH-CH ₃)	20,41	Furuyamaetal., 1969
17	Октан (C ₈ H ₁₈) («идеальный» бензин)	-208,7	Good, 1972
18	Бутилен (C ₄ H ₈)	-0,63 ± 0,79	Prosenetal., 1951
19	Гексан (C ₆ H ₁₄)	-167,2 ± 0,79	ProsenandRossini, 1945
20	Бутан (C ₄ H ₁₀)	-125,6 ± 0,67	PittamandPilcher, 1972
21	Изобутан (C ₄ H ₁₀)	-134,2 ± 0,63	PittamandPilcher, 1972
22	Бутанон (метилкетон) (C ₄ H ₈ O)	-238,6 ± 0,84	ChaoandZwolinski, 1976

Продолжение табл. П.1

Но- мер	Вещество	Энтальпия образова- ния ΔH_f° gas, кДж/моль	Первоисточник
23	Глюкоза (C ₆ H ₁₂ O ₆) (α -D-Glucose)	-1 274,5	HuffmanandFox, 1938
24	Этанол (C ₂ H ₅ OH)	-234 ± 2	N/A
25	Циклопропан (C ₃ H ₆)	39,30	Lacheretal., 1950
26	Пропиловый спирт (C ₃ H ₇ OH)	-256 ± 3	N/A
27	Бутиловый спирт (C ₄ H ₉ OH)	-277 ± 5	N/A
28	Амиловый спирт, пентанол (C ₅ H ₁₁ OH)	-298 ± 6	N/A
29	Амилацетат (CH ₃ COOC ₅ H ₁₁)	-507 ± 2	WibergandWaldron, 1991
30	Ацетон, диметилкетон (CH ₃ -C(O)-CH ₃)	-218,5 ± 0,59	Wiberg, Crocker, etal, 1991
31	Диэтиловый эфир (C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅)	-252,7 ± 2,0	PihlajaandHeikkil, 1968
32	Этилацетат (CH ₃ -COO-C ₂ H ₅)	-445,43 ± 0,84	Wiberg, Crocker, etal, 1991
33	Этилбензол (C ₈ H ₁₀)	29,8 ± 0,84	Prosenetal, 1945
34	Винилбензол, стирол (C ₈ H ₈)	146,9 ± 1,0	ProsenandRossini, 1945
35	Изопропилбензол (C ₆ H ₅ CH(CH ₃) ₂)	7,82 ± 0,84	Prosen, Gilmont, etal, 1945
36	М-ксилол, 1, 3-диметилбензол (C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂)	17,2 ± 0,75	Prosen, Johnson, etal, 1946
37	О-ксилол, 1, 2-Dimethylbenzene (C ₈ H ₁₀)	19,0 ± 1,1	Prosen, Gilmont, et al, 1945
38	(3-нитро)-о-ксилол (CH ₃) ₂ C ₆ H ₃ NO ₂	8,6 ± 1,6	Acree, Tucker, etal, 1993
39	Этилбензол (C ₆ H ₅ C ₂ H ₅)	29,8 ± 0,84	rosen, Gilmont, etal, 1945
40	Триметилбензол (C ₆ H ₃ (CH ₃) ₃)	-13,9 ± 1,1	Johnson, Prosen, etal, 1945
41	Нафталин (C ₁₀ H ₈)	150 ± 10	Rouxetal, 2008
42	Цимол, изопропил-метилбен- зол (CH ₃) ₂ CHC ₆ H ₄ CH ₃)	-21,5 ± 1,4	Prosen, Johnson, etal, 1946
43	Метилацетат (CH ₃ COOCH ₃)	-410,0	HallandBaldt, 1971

Окончание табл. П.1

Но- мер	Вещество	Энтальпия образова- ния ΔH_f° gas, кДж/моль	Первоисточник
44	Окись этилена (C_2H_4O)	-52,64	Chase, 1998
45	Окись пропилена (C_3H_6O)	-94,68 ± 0,63	SinkeandHildenbrand, 1962
46	Тетрагидрофуран ($(CH_2CH_2)_2O$)	-184,2 ± 0,71	PellandPilcher, 1965
47	1,4-диоксан ($O(CH_2CH_2)_2O$)	-315,30 ± 0,8	BystrmandMansson, 1982
48	Анилин (C_6H_7N)	87,03 ± 0,88	Hatton, Hildenbrand, et al, 1962
49	Гептан (C_7H_{16})	-187,8 ± 0,79	ProsenandRossini, 1945
50	Нонан (C_9H_{20})	-228,3	Good, 1969
51	Декан ($C_{10}H_{22}$)	-249,7 ± 1,1	ProsenandRossini, 1945
52	Циклобутан (C_4H_8)	26,65	Мищенко, 1974
53	Пентан, н-пентан (C_5H_{12})	-146,8 ± 0,59	Good, 1970
54	Циклопентан ($(CH_2)_5$)	-76,40 ± 0,79	McCulloughetal, 1959
55	Циклогексан ($(CH_2)_6$)	-123,1 ± 0,79	Prosenetal, 1946
56	Метилциклопентан $C_5H_9CH_3$	-106,7 ± 0,84	Prosen et al, 1946
57	2-Methyl-1-butene $CH_3CH_2C(CH_3) = CH_2$	-34,8	Good and Smith, 1979
58	Метилциклогексан ($C_6H_{11}CH_3$)	-154,8 ± 1,0	Prosen et al, 1946
59	Этилциклобутан $((CH_2)_3CHC_2H_5)$	-27,7 ± 0,7	Fuchs and Hallman, 1983
60	Этилциклопентан $((CH_2)_4CHC_2H_5)$	-127,1 ± 1,0	Prosen, Johnson, et al, 1946
61	Этилциклогексан ($C_6H_{11}C_2H_5$)	-172,6	Baroody and Carpenter, 1972
62	K_2S (Potassium sulfide, сульфид калия)	-346,51	Chase, 1998

Таблица П.2. Элементный состав сложных органических горючих (в массовых процентах)

Вещество	Состав
Торф	Элементный состав торфа: углерод 50–60 %, водород 5–6,5 %, кислород 30–40 %, азот 1–3 %, сера 0,1–1,5 % (иногда 2,5) на горючую массу. В компонентном составе органической массы содержание водорастворимых веществ 1–5 %, битумов 2–10 %, легкогидролизуемых соединений 20–40 %, целлюлозы 4–10 %, гуминовых кислот 15–50 %, лигнина 5–20 %. Для торфа характерно большое влагосодержание в естественном залегании (88–96 %)
Антрацит	Органическая масса антрацита характеризуется сравнительно большой влажностью (3–4 %), низким выходом летучих веществ (до 9 %), не спекается; элементный состав (%): 94–97 С, 1,0–3,0 Н и по 1,0–1,5 О и N. Антрацит не содержит гуминовых кислот, а О связан преимущественно в виде СО-групп. Удельная теплота сгорания 33,8–35,2 МДж/кг
Бурый уголь	Удельный вес 0,5–1,5. Средний химический состав, за вычетом золы: 50–77 % (в среднем 64 %) углерода, 26–37 % (в среднем 32 %) кислорода, 3–5 % водорода и 0–2 % азота. (С – 73,9 %, Н – 4,8 %, О – 8,2 %, N – 1,1 %, S – 1,5 %, W – 6 %, золы – 4,5 %)
Сланцы	Элементный состав сланца характеризуется следующими средними данными, %: углерод – 20, водород – 1,8, азот – 1,5, кислород – 4, сера – 4,7, влага – 18, зола – 50
Натуральный газ	Смесь газов, образовавшаяся в недрах земли при анаэробном разложении органических веществ. Основную часть природного газа составляет метан (СН ₄) – от 70 до 98 %. В состав природного газа могут также входить более тяжелые углеводороды – гомологи метана: этан (С ₂ Н ₆), пропан (С ₃ Н ₈), бутан (С ₄ Н ₁₀), а также другие неуглеводородные вещества: водород (Н ₂), сероводород (Н ₂ С), диоксид углерода (СО ₂), азот (N ₂), гелий (He)

Таблица П.3. Элементный состав нефти различных месторождений (в массовых процентах)

Месторождение	Плотность, г/см ³	С	Н	S	N	О	Зола
Ухтинское (РФ)	0,897	85,30	12,46	0,88	0,14	-	0,01
Грозненское (РФ)	0,850	85,95	13,00	0,14	0,07	0,74	0,10
Сураханское (Азербайджан)	0,793	85,34	14,14	0,03	-	0,49	-
Калифорнийское (США)	0,912	84,00	12,70	0,40	1,70	1,20	-

Таблица П.4. Элементарный состав целлюлозных материалов (в массовых процентах)

Горючий материал	С	Н	О	N	W	A
Дуб	46,08	5,50	38,18	1,14	7,00	2,10
Сосна	46,00	5,50	39,2	0,90	7,00	1,40
Солома	39,06	4,70	42,2	1,04	8,00	5,00
Хлопок	42,40	5,92	46,6	0,58	4,00	0,50

Таблица П.5. Элементарный состав полимеров (в массовых процентах)

Материал	С	Н	О	N
Изопреновый	88,25	11,75	-	-
Капролактан	63,7	9,75	14,2	12,3
Натуральный	88,25	11,75	-	-
Полипропилен	85,4	14,6	-	-
Полиакрилаты	55,9	6,9	37,2	-
Полиэтилен	85,8	6,9	-	-
Фенолформальдегидная смола	78,8	5,05	16,15	-

Таблица П.6. Теплосодержание газов при постоянном давлении

Температура °С	Теплосодержание, ккал/м ³				
	O ₂	N ₂	Воздух	CO ₂	H ₂ O
–	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
100	1,3	1,3	1,3	1,7	1,5
200	2,7	2,6	2,6	3,6	3,0
300	4,1	3,9	3,9	5,6	4,7
400	5,5	5,3	5,3	7,7	5,9
500	6,7	6,7	6,7	9,3	6,3
600	8,5	8,1	8,1	12,3	9,7
700	10,0	9,5	9,6	14,6	11,5
800	11,6	11,0	11,1	17,1	13,4
900	13,2	12,5	12,6	19,5	15,3
1 000	14,8	14,0	14,1	22,1	17,2
1 100	16,4	15,5	15,6	24,6	19,3
1 200	18,0	17,1	17,2	27,2	21,3
1 300	19,7	18,6	18,8	29,8	23,5
1 400	21,3	20,1	20,4	32,4	25,6
1 500	23,0	21,8	21,9	35,1	27,8
1 600	24,6	23,4	23,6	37,7	30,0
1 700	26,3	25,0	25,2	40,4	32,3

Окончание табл. П.6

Температура °С	Теплосодержание, ккал/м ³				
	O ₂	N ₂	Воздух	CO ₂	H ₂ O
1 800	28,0	26,6	26,8	43,1	34,6
1 900	29,7	28,2	28,4	45,8	36,9
2 000	31,4	29,8	30,0	48,5	39,3
2 100	33,1	31,4	31,7	51,2	41,7
2 200	35,0	33,0	33,3	53,9	44,1
2 300	36,6	34,7	35,0	56,6	46,7
2 400	38,3	36,3	36,6	59,3	48,9
2 500	40,0	38,0	38,3	62,1	51,4

Таблица П.7. Значения низшей теплоты сгорания твердых горючих веществ и материалов

Номер	Вещества и материалы	Низшая теплота сгорания Q _{гор} , МДж/кг
1	Бумага разрыхленная, книги, журналы, книги на деревянных стеллажах	13,40
2	Древесина (бруски W = 14 %)	13,80
3	Древесина (мебель в жилых и административных зданиях W = 8–10 %)	13,80
4	Кальций (стружка)	15,80
5	Канифоль	30,40
6	Киноплёнка триацетатная	18,80
7	Капрон	31,09
8	Карболитовые изделия	26,90
9	Каучук СКС	43,89
10	Каучук натуральный	44,73
11	Каучук хлоропреновый	27,99
12	Краситель жировой 5С	33,18
13	Краситель 9-78Ф п/э	20,67
14	Краситель фталоцианотен 4 "3" М	13,76
15	Ледерин (кожзаменитель)	17,76
16	Линкруст поливинилхлоридный	17,08
	Линолеум:	
17	–масляный;	20,97
18	–поливинилхлоридный;	14,31
19	–поливинилхлоридный двухслойный;	17,91
20	–поливинилхлоридный на войлочной основе;	16,57

Окончание табл. П.7

Номер	Вещества и материалы	Низшая теплота сгорания $Q_{гор}$, МДж/кг
21	–поливинилхлоридный на тканевой основе	20,29
22	Линопор	19,71
23	Магний	25,10
24	Мипора	17,40
25	Натрий металлический	10,88
26	Органическое стекло	27,67
27	Полистирол	39,00
28	Резина	33,52
29	Текстолит	20,90
30	Торф	16,60
31	Пенополиуретан	24,30
32	Волокно штапельное	13,80
33	Волокно штапельное в кипе $40 \times 40 \times 40$ см	13,80
34	Полиэтилен	47,14
35	Полипропилен	45,67
36	Хлопок в тюках $r = 190$ кг м ⁻³	16,75
37	Хлопок разрыхленный	15,70

Таблица П.8. Значения критических плотностей падающих лучистых потоков

Номер	Материалы	$q_{кр}$, кВт/м ²
1	Древесина (сосна, влажность 12 %)	13,9
2	Древесно-стружечная плита плотностью 417 кг/м ³	8,3
3	Торф брикетный	13,2
4	Торф кусковой	9,8
5	Хлопок-волокно	7,5
6	Слоистый пластик	15,4
7	Стеклопластик	15,3
8	Пергамин	17,4
9	Резина	14,8
10	Уголь	35,0
11	Рулонная кровля	17,4
12	Картон серый	10,8
13	Металлопласт, ТУ 14-1-4210–86	27,0
14	Плита древесно-волокнистая, ГОСТ 8904–81	13,0
15	Плита древесно-стружечная, ГОСТ 10632–77	12,0

Окончание табл. П.8

Номер	Материалы	$q_{кр}$, кВт/м ²
16	Плита древесно-стружечная с отделкой «Полиплен», ГОСТ 21-29-94–81	12,0
17	Плита древесно-волоконная с лакокрасочным покрытием под ценные породы дерева, ГОСТ 8904–81	12,0
18	Плита древесно-волоконная с лакокрасочным покрытием под ценные породы дерева, ТУ 400-1-199–80	16,0
19	Винилискожа обивочная пониженной горючести, ТУ 17-21-488–84	30,0
20	Винилискожа, ТУ 17-21-473–84	32,0
21	Кожа искусственная «Теза», ТУ 17-21-488–84	17,9
22	Стеклопластик на полиэфирной основе, ТУ 6-55-15–88	14,0
23	Лакокрасочные покрытия РХО, ТУ 400-1-120–85	25,0
24	Линолеум рулонный на тканевой основе	12,0
25	Линолеум ПВХ, ТУ 480-1-237–86:	
26	– с применением полотна, ТУ 17-14-148–81;	7,2
27	– с применением полотна, ТУ 17-РОФСР-18-17-003–83;	6,0
28	– на подоснове «Неткол»	9,0
29	Дорожка прутковая чистошерстяная, ТУ 17-Таджикская ССР-463–84	9,0
30	Покрытие ковровое, прошивное, ОСТ 17-50-83, арт. 5867	22,0
31	Сено, солома (при минимальной влажности до 8 %)	7,0
32	Легковоспламеняющиеся, горючие и трудногорючие жидкости при температуре самовоспламенения, °С:	
33	300;	12,1
34	350;	15,5
35	400;	19,9
36	500 и выше	28,0

Таблица П.9. Величина скорости выгорания нефти и нефтепродуктов

Нефтепродукт	Удельная скорость выгорания, кг/(м ² ·с)	Удельная скорость выгорания кг/(м ² ·ч)	Линейная скорость выгорания мм/мин
Нефть	0,03	108,0	2,04
Мазут	0,02	72,0	1,18
Дизельное топливо	0,055	198,0	4,18
Керосин	0,048	172,0	3,84
Бензин	0,053	190,8	4,54

Таблица П.10. Детерминированные показатели опасности воздействия избыточного давления для зданий (приказ МЧС РФ 533)

Степень поражения	Избыточное давление, кПа
Полное разрушение зданий	100
50-процентное разрушение зданий	53
Средние повреждения зданий	28
Умеренные повреждения зданий (повреждение внутренних перегородок, рам, дверей и т. п.)	12
Нижний порог повреждения человека волной давления	5
Малые повреждения (разбита часть остекления)	3

Таблица П.11. Детерминированные показатели опасности воздействия избыточного давления на человека

Степень поражения	Избыточное давление, кПа
Смертельное поражение	>120
Тяжелое: обширное повреждение внутренних органов. Возможны смертельные случаи	60–100
Средние: повреждение органов слуха, вывихи, переломы	40–60
Легкие: общая контузия, повреждение слуха, ушибы	20–40
Косвенные: осколками и обломками	10–20
Нижний порог повреждения человека волной давления	5

Таблица П.12. Зависимость степени разрушения от инженерно-технических конструкций от избыточного давления ΔP (кПа)

Элементы ИТК	Степень разрушения		
	Сильная	Средняя	Слабая
Цех с легким металлическим каркасом	50–30	30–20	20–10
Кирпичные здания	30–20	20–12	2–8
Цистерны ж/д	90–60	60–40	40–20
Грузовая машина	>50	50–40	40–20
ЛЭП	120–80	80–50	50–20
Трубопроводы наземные	>130	130–50	50–20
Трубопроводы на эстакаде	50–40	40–30	30–20
Наземные резервуары ГСМ	100–50	50–30	30–10
Подземные резервуары ГСМ	200–100	100–50	50–30

Окончание табл. П.12

Элементы ИТК	Степень разрушения		
	Сильная	Средняя	Слабая
ТЭС	25–20	20–15	15–10
Водонапорная башня	60–40	40–20	20–10
Деревянные дома	30–20	20–10	<10
Цех с легким металлическим каркасом	50–30	30–20	20–10
Кирпичные здания	30–20	20–12	2–8

Примечание. Полное разрушение – обрушение зданий. Сильные разрушения – разрушения несущих конструкций и перекрытий, ущерб – 50 %. Ремонт нецелесообразен. Слабое разрушение – возможен ремонт.

Таблица П.13. Степень поражения человека от теплового излучения (приказ МЧС РФ № 533)

Степень поражения	Интенсивность излучения, кВт/м ²
Без негативных последствий в течение длительного времени	1,4
Безопасно для человека в брезентовой одежде	4,2
Непереносимая боль через 20–30 с. Ожог 1-й степени через 15–20 с. Ожог 2-й степени через 30–40 с	7,0
Непереносимая боль через 3–5 с. Ожог 1-й степени через 6–8 с. Ожог 2-й степени через 12–16 с	10,5

Таблица П.14. Показатели пожаровзрывоопасности горючих пылей (ГОСТ 12.1.041–83 в редакции от 01.06.2001)

Горючее вещество	НКПР, г/м ³	W _{min} , мДж	t _{св} , °С	P _{max} , кПа	dP/dτ, кПа·с	МВСК, % по объему
Пластмассы						
Полимер метилметакрилата	30	20	-	590	14000	8,0
Сополимер метилметакрилата и этилакрилата	30	10	-	600	42180	11,0
Сополимер метилметакрилата, этилстирола и стирола	25	20	-	630	31930	-
Сополимер метилметакрилата, стирола, бутадиена и акрилонитрила	25	20	480	600	33000	11,0

Продолжение табл. П.14

Горючее вещество	НКПР, г/м ³	W _{min} , мДж	t _{св} , °С	P _{max} , кПа	dP/dt, кПа·с	МВСК, % по объему
Пластмассы						
Сополимер метилметакрилата, стирола, бутадиена и этилакрилата	25	25	480	590	30230	13,0
Полимер акриламида	40	30	240	600	17580	-
Сополимер акриламида и винилбензилтриметил аммоний хлорида	1000	8000	500	90	700	-
Полимер акрилнитрила	25	20	-	630	77330	13,0
Сополимер акрилонитрила и винилпиридина	20	25	240	600	42180	-
Смола мочевино-формальдегидная	135	1280	-	370	3520	15,0
Смола феноланилиноформальдегидная	71	-	-	700	28000	13,0
Смола фенолформальдегидная	55	10	420	650	33300	14,0
Смола фенольная	25	10	460	550	12000	-
Смола эпоксидная без катализатора	20	15	540	647	41340	12,0
Полистирол	25	15	488	720	29000	10,0
Полиацеталь	60	-	470	642	56650	-
Поливинилпирролидон высокомолекулярный	56	-	370	450	31600	11,0
Полиизобутилметакрилат	160	-	319	200	-	15,0
Полимарцин технический	137	8,2	265	580	7500	18,0
Полипропилен	32,7	3,4	395	-	-	-
Полиэтилен	12	30	440	560	-	13,0
Полиэфир	45	50	485	640	-	-
Порошок ПБ-2В, фенолформальдегидное связующее, продукт аминотилирования новолачной фенолформальдегидной смолы с 8 % уротропина	47		355	700	9500	14,0
Винилхлоридкрилонитрил вододисперсионный (сополимер 33-57)	35	15	470	660	51800	15,0
Химические средства защиты растений						
Диносеб технический	52	8	325	436	7600	10,5
Ленацил технический	15	3,2	432	-	-	9,0
Поликарбацин, 80-процентный смачивающийся порошок	92	21,3	195	912	41000	14,5
Карбофос, 30-процентный смачивающийся порошок	300	100	295	-	-	-
Нихлозин, 30-процентный смачивающийся порошок	460	100	495	-	-	-
Диазинон, 40-процентный смачивающийся порошок	99	96,4	395	-	-	16,1
ФДН, 50-процентный смачивающийся порошок	63	6,3	429	-	-	14,1
Топсин, 70-процентный смачивающийся порошок	61	8,6	457	-	-	16,1

Продолжение табл. П.14

Горючее вещество	НКПР, г/м ³	W _{min} , мДж	t _{св} , °С	P _{max} , кПа	dP/dτ, кПа·с	МВСК, % по объему
Химические средства защиты растений						
Гексатиурам, 80-процентный смачивающийся порошок	87	6,2	297	-	-	12,1
Полихом, 80-процентный смачивающийся порошок	250	7,5	185	-	-	14,1
Симазин технический	26	9,0	530	550	7600	13,5
Лекарственные препараты						
Витамин А	45	80	250	570	35000	-
Витамин В	35	60	360	680	41500	-
Витамин В	106	80	510	840	32500	-
Витамин С	60	20	280	610	33200	-
Вулкацимат ДА, этилцимат	21	27	-	120	53600	-
Металлы						
Цирконий	40	5	190	450	44500	+У:+А
Титан	60	25	510	371	23800	+У:І
Магний	25	10	490	500	70000	+У
Алюминий	10	0,025	470	660	63000	2,0
Алюминиево-магниевый сплав	25	0,047	280	600	70000	+У:+А
Торий	75	5	270	350	23000	2,0
Силикокальций	42	150	490	660	30000	8,0
Железо карбонильное	105	20	310	300	17000	10,0
Ферротитан	140	80	400	370	67000	13,0
Железо восстановленное	66	80	475	250	50000	11,0
Ферромарганец	130	0,25	240	330	30000	-
Марганец	90	180	240	340	20000	15,0
Тантал	190	140	290	400	28000	14,0
Олово	190	80	430	260	9000	16,0
Цинк	480	0,15	460	350	13000	10,0
Бронзовая пудра	1000	-	190	300	9000	-
Ферросилиций	150	280	860	620	26000	15,0
Сельскохозяйственные продукты						
Мука ржаная обдирная ГОСТ 7045–90	78	13,3	500	540	11000	11,5
Ячмень дробленый	47	14,2	470	435	7100	12,5
Кукуруза дробленая ГОСТ 13634–90	50	23,4	355	570	9800	10,5
Сорго дробленое ГОСТ 8759–92	36	17,2	-	575	8000	19,5
Пшеница дробленая	33	23,5	415	470	5300	13,5
Отруби пшеничные ГОСТ 7169–66	42	16,5	470	540	8600	16,5
Ячменная мука	47,26	11,6	470	635	17600	12,5
Арахис	45	50	210	810	56000	-
Мука пшеничная в/с	28,8	50	380	650	13000	11,0
Пробковая мука	35	45	260	700	-	10,0
Крахмал зерновой	40	30	625	770	-	10,0
Горох	79,0	-	525	562	20700	12,5
Соя	35	40	215	700	17200	15,0

Продолжение табл. П.14

Горючее вещество	НКПР, г/м ³	W _{min} , мДж	t _{св} , °С	P _{max} , кПа	dP/dτ, кПа·с	МВСК, % по объему
Сельскохозяйственные продукты						
Древесная мука	13-25	20	255	770	17000	17,0
Торфяная пыль	50	41	205	250	9200	11,0
Неорганические вещества						
Фосфор красный	14	0,05	305	700	33000	4,0
Фосфор пятисернистый	20	-	265	510	40000	5,0
Сера	17	-	190	460	13300	5,0
Кремний	100	2,1	790	530	84000	11,0
Бор	100	60	400	630	17000	-
Органические вещества						
Адипиновая кислота	35	70	410	630	19300	-
4,4'-азобензолдикарбоновая кислота	113	-	365	470	6766	13,0
1-аминоатрихинон, -антрахинониламмин	38	-	612	650	15600	13,0
1-аминоатрахинон сульфат	254	-	600	170	4800	16,0
1-амино-4-ацетиламиноанизол	29	-	438	175	-	14,0
1-амино-5-бензоламиноантрахинон	34	-	545	350	6000	12,0
1-амино-4-мезидиноантрахинон	55	-	545	540	6600	16,0
Амино-салициловая кислота техниче- ская	98	-	450	250	-	11,0
2-аминофенол	55	-	390	830	-	11,0
4-аминофенол	40	-	500	568	5884	16,0
1-амино-4-хлорантрахинон	60	-	684	550	35000	16,5
N-бензоил-2-аминобензойная кислота	74	-	520	650	60000	13,5
Бензойная кислота	20	-	532	640	-	9,0
Бериллий ацетат	80	100	620	600	15000	15,0
Транс-бутендиновая кислота, транс-2- бутен-2,3-диононая кислота, фумаровая кислота	85	35	375	710	17250	15,0
Гексаметилентетрамин	15	10	340	680	76000	14,0
2-гидроксибензойная кислота, салици- ловая кислота	50	-	543	500	30000	10,0
4-гидроксибензойная кислота, N-окси- бензойная кислота	26	-	550	600	-	12,0
4-гидрокси-3-метоксибензальдегид, ва- нилин, ванилильдегид	40	3,3	280	460	68000	-
Декстрин	40	-	400	680	19300	10,0
Диазоминобензол	15	20	-	790	70000	-
Диаминоантрорурфин	79	-	260	330	10000	14,5
1,2-диаминоантрахинон	61	-	628	800	77000	-
1,4-диамино-2-бензоилантрахинон	50	-	650	680	23700	13,0
Дигидрострептомицин сульфат	52	-	230	-	10000	7,0
Диметилизофталат	25	15	-	580	5520	13,0
Диметилтерефталат	30	20	-	725	82680	12,0
2,4-дихлорбензоксиптилбензоат	45	60	-	680	15200	-
Казеин, фосфорпротеид	45	60	-	760	35000	17,0

Окончание табл. П.14

Горючее вещество	НКПР, г/м ³	W _{min} , мДж	t _{св} , °С	P _{max} , кПа	dP/dτ, кПа·с	МВСК, % по объему
Органические вещества						
Железо, диметилкарбонатфербам	15	25	150	600	41500	-
Лиладос	35	-	230	300	-	13,0
Люминафор зеленый	103	-	385	800	4500	19,0
Резиновая мука	74–79	2	377	550	20000	14,0

Примечания.

1. +У – воспламеняется в углекислом газе; +А – воспламеняется в азоте.

2. Приведенные значения показателей пожаровзрывоопасности могут изменяться в широких пределах в зависимости от химической чистоты вещества, распределения частиц по размерам, состояния их поверхности и т. д. Для практического применения значения показателей необходимо подтвердить расчетом или уточнить экспериментальными методами по ГОСТ 12.1.044–2018.

Таблица П.15. Значения показателей пожарной опасности некоторых индивидуальных веществ

Вещество	Химическая формула	Молярная масса, кг/кмоль	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, % (об.)	Температура кипения при 1 атм, °С	Теплота сгорания, кДж/кг
					A	B	CA				
Амилацетат	C ₇ H ₁₄ O ₂	130,196	+43	+290	6,29350	1579,510	221,365	25÷147	1,08	149	29879
Амилен	C ₅ H ₁₀	70,134	<-18	+273	5,91048	1014,294	229,783	-60÷100	1,49	30	45017
н - Амиловый спирт	C ₅ H ₁₂ O	88,149	+48	+300	6,3073	1287,625	161,330	74÷157	1,46	132	38385
Аммиак	NH ₃	17,03	-	+650	-	-	-	-	15,0	-33	18585
Анилин	C ₆ H ₇ N	93,128	+73	+617	6,04622	1457,02	176,195	35÷184	1,3	184	32386
Ацетальдегид	C ₂ H ₄ O	44,053	-40	+172	6,31653	1093,537	233,413	-80÷20	4,12	20	27071
Ацетилен	C ₂ H ₂	26,038	-	+335	-	-	-	-	2,5	-84	49965
Ацетон	C ₃ H ₆ O	58,08	-18	+535	6,37551	1281,721	237,088	-15÷93	2,7	56	31360
Бензойная кислота	C ₇ H ₆ O ₂	122,12	+121	+534	6,5788	1819,9979	147,95	-	-	250	26454
Бензол (-20÷-6)	C ₆ H ₆	78,113	-11	+560	5,61391	902,275	178,099	-20÷-6	1,43	80	40576
Бензол (-7÷+80)					6,10906	1252,776	225,178	-7÷80			
1,3-Бутадиен	C ₄ H ₆	54,091	-	+430	5,9748	930,5454	238,85	-	2,0	-4	44573
н-Бутан	C ₄ H ₁₀	58,123	-69	+405	6,00525	968,098	242,555	-130÷0	1,8	-1	45713
1-Бутен	C ₄ H ₈	56,107	-	+384	5,9677	926,0982	240,00	-	1,6	-6	45317
2-Бутен	C ₄ H ₈	56,107	-	+324	5,9941	960,0992	237,00	-	1,8	4	45574
н-Бутилацетат	C ₆ H ₁₂ O ₂	116,16	+29	+330	6,25205	1430,418	210,745	59÷126	1,35	-77	28280
втор(изо)-Бутилацетат	C ₆ H ₁₂ O ₂	116,16	+19	+410	6,1479	1343,1990	207,00	-	1,4	117	28202
н - Бутиловый спирт	C ₄ H ₁₀ O	74,122	+35	+340	8,72232	2664,684	279,638	-1÷126	1,8	117	36805
Винилхлорид	C ₂ H ₃ Cl	62,499	-	+470	6,0161	905,008	239,475	-65÷ -13	3,6	-13	18496
Водород	H ₂	2,016	-	+510	-	-	-	-	4,12	-253	119841
н - Гексадекан	C ₁₆ H ₃₄	226,44	+128	+207	5,91242	1656,405	136,869	105÷287	0,47	287	44312
н - Гексан	C ₆ H ₁₄	86,177	-23	+233	5,99517	1166,274	223,661	-54÷69	1,24	68	45105
н - Гексиловый спирт	C ₆ H ₁₄ O	102,17	+60	+285	6,17894 7,23663	1293,831 1872,743	152,631 202,666	52÷157 60÷108	1,2	157	39587
Гептан	C ₇ H ₁₆	100,203	-4	+223	6,07647	1295,405	219,819	60÷98	1,07	98	44919
Гидразин	N ₂ H ₄	32,045	+38	+132	7,99805	2266,447	266,316	84÷112	4,7	114	14644
Глицерин	C ₃ H ₈ O ₃	92,1	+198	+400	8,177393	3074,220	214,712	141263	2,6	290	16102

Продолжение табл. П.15

Вещество	Химическая формула	Молярная масса, кг/кмоль	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, % (об.)	Температура кипения при 1 атм, °С	Теплота сгорания, кДж/кг
					A	B	CA				
Декан	C ₁₀ H ₂₂	142,28	+47	+230	6,52023	1 809,975	227,700	17÷174	0,7	174	44 602
Дивиниловый эфир (Триэтиленгликоль)	C ₄ H ₆ O	70,1	-30	+360	-	-	-	-	1,7	242	32 610
N, N-Диметилформамид	C ₃ H ₇ ON	73,1	+53	+440	6,15939	1 482,985	204,342	25÷153	2,35	153	-
1,4-Диоксан	C ₄ H ₈ O ₂	88,1	+11	+375	6,64091	1 632,425	250,725	12÷101	2,0	101	-
1,2-Дихлорэтан	C ₂ H ₄ Cl ₂	98,96	+9	+413	6,78615	1 640,179	259,715	-24÷83	6,2	83	10 873
Диэтиламин	C ₄ H ₁₁ N	73,14	-14	+310	6,34794	1 267,557	236,329	-33÷59	1,78	56	34 876
Диэтиловый эфир	C ₄ H ₁₀ O	74,12	-41	+180	6,12270	1 098,945	232,372	-60÷35	1,7	35	34 147
н - Додекан	C ₁₂ H ₂₆	170,337	+77	+202	7,29574	2 463,739	253,884	48÷214	0,63	174	44 470
Изобутан	C ₄ H ₁₀	58,123	-76	+462	5,95318	916,054	243,783	-159÷12	1,81	-12	45 578
Изобутилен	C ₄ H ₈	56,11	-	+465	-	-	-	-	1,78	-7	45 928
Изобутиловый спирт	C ₄ H ₁₀ O	74,12	+28	+390	7,83005	2 058,392	245,642	-9÷116	1,8	108	36 743
Изопентан	C ₅ H ₁₂	72,15	-52	+432	5,91799	1 022,551	233,493	-83÷28	1,35	28	45 239
Изопропилбензол	C ₉ H ₁₂	120,20	+37	+424	6,06756	1 461,643	207,56	2,9÷152,4	0,88	152	46 663
Изопропиловый спирт	C ₃ H ₈ O	60,09	+14	+430	7,51055	1 733,00	232,380	-26÷148	2,23	83	34 139
м - Ксилол	C ₈ H ₁₀	106,17	+28	+530	6,13329	1 461,925	215,073	-20÷220	1,1	139	52 829
о - Ксилол	C ₈ H ₁₀	106,17	+31	+460	6,28893	1 575,114	223,579	-3,8÷144,4	1,0	144	41 217
п - Ксилол	C ₈ H ₁₀	106,17	+26	+528	6,25485	1 537,082	223,608	-8,1÷138,3	1,1	140	41 207
Метан	CH ₄	16,04	-	+537	5,68923	380,224	264,804	-182÷ -162	5,28	-162	50 000
Метиловый спирт	CH ₄ O	32,04	+6	+440	7,3527	1 660,454	245,818	-10÷90	6,98	65	23 839
Метилпропилкетон	C ₅ H ₁₀ O	86,133	+6	+452	6,98913	1 870,4	273,2	-17÷103	1,49	101	33 879
Метилэтилкетон	C ₄ H ₈ O	72,107	-6	-	7,02453	1 292,791	232,340	-48÷80	1,90	80	-
Нафталин	C ₁₀ H ₈	128,06	+80	+520	9,67944 6,7978	3 123,337 2 206,690	243,569 245,127	0÷80 80÷159	0,9	218	39 435
н - Нонан	C ₉ H ₂₀	128,257	+31	+205	6,17776	1 510,695	211,502	2÷150	0,78	151	44 684
Оксид углерода	CO	28,01	-	+605	-	-	-	-	12,5	-192	10 104

Продолжение табл. П.15

Вещество	Химическая формула	Молярная масса, кг/кмоль	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, % (об.)	Температура кипения при 1 атм, °С	Теплота сгорания, кДж/кг
					A	B	CA				
Оксид этилена	C ₂ H ₄ O	44,05	-18	+430	-	-	-	-	3,2	11	27 696
н - Октан	C ₈ H ₁₈	114,230	+14	+215	6,09396	1 379,556	211,896	-14÷126	0,9	126	44 787
н - Пентадекан	C ₁₅ H ₃₂	212,42	+115	+203	6,0673	1 739,084	157,545	92÷270	0,5	271	44 342
н - Пентан	C ₅ H ₁₂	72,150	-44	+286	5,97208	1 062,555	231,805	-50÷36	1,47	36	45 350
γ - Пиколин	C ₆ H ₇ N	93,128	+39	+578	6,44382	1 632,315	224,787	70÷145	1,4	96	36 702
Пиридин	C ₅ H ₅ N	79,10	+20	+530	5,91684	1 217,730	196,342	-19÷116	1,8	115	35 676
Пропан	C ₃ H ₈	44,096	-96	+470	5,95547	813,864	248,116	-189÷ -42	2,3	-42	46 353
Пропилен	C ₃ H ₆	42,080	-	+455	5,94852	786,532	247,243	-107,3÷-47,1	2,4	-47	45 604
н - Пропиловый спирт	C ₃ H ₈ O	60,09	+23	+371	7,44201	1 751,981	225,125	0÷97	2,3	97	34 405
Сероводород	H ₂ S	34,076	-	+246	-	-	-	-	4,3	-60	-
Сероуглерод	CS ₂	76,14	-43	+102	6,12537	1 202,471	245,616	-15÷80	1,0	46	14 020
Стирол	C ₈ H ₈	104,14	+30	+490	7,06542	2 113,057	272,986	-7÷146	1,1	145	43 888
Тетрагидрофуран	C ₄ H ₈ O	72,1	-20	+250	6,12008	1 202,29	226,254	23÷100	1,8	66	34 730
н - Тетрадекан	C ₁₄ H ₃₀	198,39	+103	+201	6,40007	1 950,497	190,513	76÷254	0,5	253	44 377
Толуол	C ₇ H ₈	92,140	+7	+535	6,0507	1 328,171	217,713	-26,7÷110,6	1,27	111	40 936
н - Тридекан	C ₁₃ H ₂₈	184,36	+90	+204	7,09388	2 468,910	250,310	59÷236	0,58	235	44 424
2,2,4 - Триметилпентан	C ₈ H ₁₈	114,230	-4	+411	5,93682	1 257,84	220,735	-60÷175	1,0	99	44 647
Уксусная кислота	C ₂ H ₄ O ₂	60,05	+40	+465	7,10337	1 906,53	255,973	-17÷118	4,0	118	13 097
н - Ундекан	C ₁₁ H ₂₄	156,31	+62	+205	6,80501	2 102,959	242,574	31÷197	0,6	174	44 527
Формальдегид	CH ₂ O	30,03	-	+430	5,40973	607,399	197,626	-19÷60	7,0	-19	19 007
Фталевый ангидрид	C ₈ H ₄ O ₃	148,1	+153	+580	7,12439	2 879,067	277,501	134÷285	1,7 (15г/м ³)	295	-
Хлорбензол	C ₆ H ₅ Cl	112,56	+29	+637	6,38605	1 607,316	235,351	-35÷132	1,4	132	27 315
Хлорэтан	C ₂ H ₅ Cl	64,51	-50	+510	6,11140	1 030,007	238,612	-56÷12	3,8	12	19 392
Циклогексан	C ₆ H ₁₂	84,16	-17	+259	5,96991	1 203,526	222,863	6,5÷200	1,3	81	43 833
Этан	C ₂ H ₆	30,069	-	+515	-	-	-	-	2,9	-89	52 413

Окончание табл. П.15

Вещество	Химическая формула	Молярная масса, кг/кмоль	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, % (об.)	Температура кипения при 1 атм, °С	Теплота сгорания, кДж/кг
					A	B	CA				
Этилацетат	$C_4H_8O_2$	88,10	-3	+446	6,22672	1244,951	217,881	15÷75,8	2,0	77	23 587
Этилбензол	C_8H_{10}	106,16	+20	+431	6,35879	1590,660	229,581	-9,8÷136,2	1,0	136	41 323
Этилен	C_2H_4	28,05	-	+435	-	-	-	-	2,7	-104	46 988
Этиленгликоль	$C_2H_8O_2$	62,068	+111	+412	8,13754	2753,183	252,009	53÷198	4,29	197	19 329
Этиловый спирт	C_2H_6O	46,07	+13	+400	7,81158	1918,508	252,125	-31÷78	3,6	78	30 562
Этилцеллозольв	$C_4H_{10}O_2$	90,1	+40	+235	7,86626	2392,56	273,15	20÷135	1,8	135	26 382

Таблица П.16. Значения показателей пожарной опасности некоторых смесей и технических продуктов

Продукт (ГОСТ, ТУ) (состав смеси), % (масс.)	Суммарная формула	Молярная масса, кг/кмоль	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значе- ний констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентра- ционный предел распро- странения пламени, % (об.)	Характери- стика вещества	Теплота сгора- ния, кДж/кг
					A	B	CA				
Бензин авиационный Б-70 (ГОСТ 1012-72)	$C_{7,267}H_{14,796}$	102,2	-34	300	7,54424	2 629,65	384,195	-40÷100	0,79	ЛВЖ	44 094
Бензин А-72 (зимний) (ГОСТ 2084-67)	$C_{6,991}H_{13,108}$	97,2	-36	-	4,19500	682,876	222,066	-60÷85	1,08	ЛВЖ	44 239
Бензин АИ-93 (летний) (ГОСТ 2084-67)	$C_{7,024}H_{13,708}$	98,2	-36	-	4,12311	664,976	221,695	-60÷95	1,06	ЛВЖ	43 641
Бензин АИ-93 (зимний) (ГОСТ 2084-67)	$C_{6,911}H_{12,168}$	95,3	-37	-	4,26511	695,019	223,220	-60÷90	1,1	ЛВЖ	43 641
Дизельное топливо "З" (ГОСТ 305-73)	$C_{12,343}H_{23,889}$	172,3	>+35	+225	5,07818	1 255,73	199,523	40÷210	0,61	ЛВЖ	43 590
Дизельное топливо "Л" (ГОСТ 305-73)	$C_{14,511}H_{29,120}$	203,6	>+40	+210	5,00109	1 314,04	192,473	60÷240	0,52	ЛВЖ	43 419
Керосин осветительный КО-20 (ГОСТ 4753-68)	$C_{13,595}H_{26,860}$	191,7	>+40	+227	4,82177	1 211,73	194,677	40÷240	0,55	ЛВЖ	43 692
Керосин осветительный КО-22 (ГОСТ 4753-68)	$C_{10,914}H_{21,832}$	153,1	>+40	+245	5,59599	1 394,72	204,260	40÷190	0,64	ЛВЖ	43 692
Керосин осветительный КО-25 (ГОСТ 4753-68)	$C_{11,054}H_{21,752}$	154,7	>+40	+236	5,12496	1 223,85	203,341	40÷190	0,66	ЛВЖ	43 692
Ксилол (смесь изомеров) (ГОСТ 9410-60)	C_8H_{10}	106,17	+29	+490	6,17972	1 478,16	220,535	0÷50	1,1	ЛВЖ	43 154
Уайт-спирит (ГОСТ 3134-52)	$C_{10,5}H_{21,0}$	147,3	>+33	+250	7,13623	2 218,3	273,15	20÷80	0,7	ЛВЖ	43 966
Масло трансформаторное (ГОСТ 10121-62)	$C_{21,74}H_{42,28}S_{0,04}$	303,9	>+135	+270	6,88412	2 524,17	174,010	164÷343	0,29	ГЖ	43 111
Масло АМТ-300 (ТУ 38-1Г-68)	$C_{22,25}H_{33,48}S_{0,34}N_{0,07}$	312,9	>+170	+290	6,12439	2 240,001	167,85	170÷376	0,2	ГЖ	42 257
Масло АМТ-300 Г (ТУ 38101243-72)	$C_{19,04}H_{24,58}S_{0,196}N_{0,04}$	260,3	>+189	+334	5,62020	2 023,77	164,09	171÷396	0,2	ГЖ	41 778

Продолжение табл. П.16

Продукт (ГОСТ, ТУ) (состав смеси), % (масс.)	Суммарная формула	Молярная масса, кг/кмоль	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, % (об.)	Характеристика вещества	Теплота сгорания, кДж/кг
					А	В	СА				
Растворитель Р-4 (н-бутилацетат-12, толуол-62, ацетон-26)	$C_{5,452}H_{7,608}O_{0,535}$	81,7	-7	+550	6,29685	1 373,667	242,828	-15÷100	1,65	ЛВЖ	40 936
Растворитель Р-4 (ксилол-15, толуол-70, ацетон-15)	$C_{6,231}H_{7,798}O_{0,223}$	86,3	-4	-	6,27853	1 415,199	244,752	-15÷100	1,38	ЛВЖ	43 154
Растворитель Р-5 (н-бутилацетат-30, ксилол-40, ацетон-30)	$C_{5,309}H_{8,655}O_{0,397}$	86,8	-9	-	6,30343	1 378,851	245,039	-15÷100	1,57	ЛВЖ	43 154
Растворитель Р-12 (н-бутилацетат-30, ксилол-10, толуол-60)	$C_{6,837}H_{9,217}O_{0,515}$	99,6	+10	-	6,17297	1 403,079	221,483	0÷100	1,26	ЛВЖ	43 154
Растворитель М (н-бутилацетат-30, этилацетат-5, этиловый спирт-60, изобутиловый спирт-5)	$C_{2,761}H_{7,147}O_{1,187}$	59,36	+6	+397	8,05697	2 083,566	267,735	0÷50	2,79	ЛВЖ	36 743
Растворитель РМЛ (ТУКУ 467-56) (толуол-10, этиловый спирт-64, н-бутиловый спирт-10, этилцеллозольв-16)	$C_{2,645}H_{6,810}O_{1,038}$	55,24	+10	+374	8,69654	2 487,728	290,920	0÷50	2,85	ЛВЖ	40 936
Растворитель РМЛ-218 (МРТУ 6-10-729-68) (н-бутилацетат-9, ксилол-21,5, толуол-21,5, этиловый спирт-16, н-бутиловый спирт-3, этилцеллозольв-13, этилацетат-16)	$C_{4,791}H_{8,318}O_{0,974}$	81,51	+4	+399	7,20244	1 761,043	251,546	0÷50	1,72	ЛВЖ	43 154

Окончание табл. П.16

Продукт (ГОСТ, ТУ) (состав смеси), % (масс.)	Суммарная формула	Молярная масса, кг/кмоль	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, % (об.)	Характеристика вещества	Теплота сгорания, кДж/кг
					A	B	CA				
Растворитель РМЛ-315 (ТУ 6-10-1013-70) (н-бутилацетат-18, ксилол-25, толуол-25, н-бутиловый спирт-15, этилцеллозольв-17)	$C_{5,962}H_{9,779}O_{0,845}$	94,99	+16	+367	6,83653	1 699,687	241,00	0÷50	1,25	ЛВЖ	43 154
Уайт-спирит (ГОСТ 313452)	$C_{10,5}H_{21,0}$	147,3	>+33	+250	7,13623	2 218,3	273,15	20÷80	0,7	ЛВЖ	43 966

Учебное издание

Чернов Анатолий Альбертович
Татаренко Валерий Иванович

ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

Редактор *О. В. Георгиевская*
Компьютерная верстка *А. П. Бочарниковой*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 20.05.2026. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 6,74. Тираж 88 экз. Заказ 92.

Гигиеническое заключение

№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Издательско-полиграфический центр СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в издательско-полиграфическом центре СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8