

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

С.А. Лебедев

ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины и практическим занятиям для студентов, обучающихся в бакалавриате по направлению подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность

Калининград
2025

Рецензент
заведующий кафедрой техносферной безопасности
и природообустройства ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет», канд. биол. наук, доцент Н.Р. Ахмедова

Лебедев, С.А. Теория горения и взрыва: учеб.-метод. пособие по изучению дисциплины и практическим занятиям для студ. бакалавриата по напр. подгот. 20.03.01 Техносферная безопасность / С.А. Лебедев. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2025. – 79 с.

В учебно-методическом пособии по изучению дисциплины «Теория горения и взрыва» представлены учебно-методические материалы по освоению тем лекционного курса, методические указания по выполнению практических работ, типовые тестовые задания по дисциплине, вопросы для самоконтроля.

Список лит. – 6 наименований

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины и практическим занятиям рекомендовано к изданию в качестве локального электронного методического материала для использования в учебном процессе методической комиссией института рыболовства и аквакультуры ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» «27» июня 2025 г., протокол № 6

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ЗАНЯТИЯМ	8
ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН ЗАНЯТИЙ	9
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ ...	14
ТИПОВЫЕ ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ	62
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ.....	67
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	69
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	70
ПРИЛОЖЕНИЯ	71

ВВЕДЕНИЕ

Учебно-методическое пособие разработано для обучающихся по направлению подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность по дисциплине «Теория горения и взрыва», входящей в Блок 1. Дисциплины (модули). Обязательная часть.

Знания, полученные при освоении дисциплины «Теория горения и взрыва», используются при выполнении выпускной квалификационной работы и в профессиональной деятельности.

Дисциплина «Теория горения и взрыва» является базовой дисциплиной, формирующей у обучающихся знания о теоретических основах прогнозирования условий образования горючих и взрывоопасных систем, определения параметров инициирования горения и взрыва и оценки возможности перехода горения во взрыв, навыков анализа потенциальной взрывоопасности смесей горючего с окислителем, определения термодинамических параметров горения и взрыва, расчета давления в ударных волнах и прогнозирования разрушающего действия взрыва.

Целью дисциплины является освоение компетенций в соответствии с образовательной программой.

Дисциплина имеет целью также сформировать у будущего специалиста представлений о теоретических основах прогнозирования условий образования горючих и взрывоопасных систем, определению параметров инициирования горения и взрыва, а также оценки возможности перехода горения во взрыв.

Задачи изучения дисциплины:

- приобретение студентами знаний, способствующих адекватной качественной оценке процессов горения и взрыва в конкретных технологических условиях;
- освоение методов расчёта характеристик смесей различных горючих веществ, составления балансов процесса горения любого вида топлива, технологических методов расчета процесса горения;
- формирование навыков, необходимых для количественного определения физико-химических параметров горения и взрыва.

В результате освоения учебной дисциплины обучающиеся должны:

знать:

- теоретические основы процессов горения;
- физико-химические процессы, протекающие в горючих веществах;
- классификацию процессов горения и пламен, типы взрывов;
- особенности процессов горения веществ в различном агрегатном состоянии;

- меры безопасности при работе с горючими веществами;

уметь:

- определять основные физические характеристики органических веществ;

- пользоваться нормативно-технической документацией по вопросам пожаро- и взрывобезопасности;

-рассчитывать материальные балансы процессов горения веществ в различном агрегатном состоянии;

- рассчитывать основные характеристики и параметры процессов горения и взрыва;

владеть:

- представлениями о способах хранения и эксплуатации горючих веществ;

- методиками определения основных характеристик горючих веществ;

- методиками расчетов процессов горения и взрыва.

К оценочным средствам текущего контроля успеваемости относятся:

- тестовые задания открытого и закрытого типов.

К оценочным средствам для промежуточной аттестации относятся:

- экзаменационные задания по дисциплине, представленные в виде тестовых заданий закрытого и открытого типов.

Критерии оценки результатов освоения дисциплины

Универсальная система оценивания результатов обучения включает в себя системы оценок: 1) «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно»; 2) «зачтено», «не зачтено»; 3) 100–балльную/процентную систему и правило перевода оценок в пятибалльную систему (табл. 2).

Таблица 2 – Система оценок и критерии выставления оценки

Система оценок Критерий	2	3	4	5
	0-40 %	41-60 %	61-80 %	81-100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
1 Системность и полнота знаний в отношении изучаемых объектов	Обладает частичными и разрозненными знаниями, которые не может научно корректно связывать между собой (только некоторые из которых может	Обладает минимальным набором знаний, необходимым для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает набором знаний, недостаточным для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает полной знаний и системным взглядом на изучаемый объект

Система оценок Критерий	2	3	4	5
	0-40 %	41-60 %	61-80 %	81-100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
	связывать между собой)			
2 Работа с информацией	Не в состоянии находить необходимую информацию, либо в состоянии находить отдельные фрагменты информации в рамках поставленной задачи	Может найти необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, интерпретировать и систематизировать необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, систематизировать необходимую информацию, а также выявить новые, дополнительные источники информации в рамках поставленной задачи
3 Научное осмысление изучаемого явления, процесса, объекта	Не может делать научно корректных выводов из имеющихся у него сведений, в состоянии проанализировать только некоторые из имеющихся у него сведений	В состоянии осуществлять научно корректный анализ предоставленной информации	В состоянии осуществлять систематический и научно корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные задачи данные	В состоянии осуществлять систематический и научно корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные поставленной задаче данные, предлагает новые ракурсы поставленной задачи
4 Освоение стандартных алгоритмов решения профессиональных задач	В состоянии решать только фрагменты поставленной задачи в соответствии с заданным алгоритмом, не освоил предложенный алгоритм, допускает ошибки	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом, понимает основы предложенного алгоритма	Не только владеет алгоритмом и понимает его основы, но и предлагает новые решения в рамках поставленной задачи

Оценивание тестовых заданий закрытого типа осуществляется по системе зачтено/ не зачтено («зачтено» – 41-100 % правильных ответов; «не зачтено» – менее 40 % правильных ответов) или пятибалльной системе (оценка «неудовлетворительно» – менее 40 % правильных ответов; оценка «удовлетворительно» - от 41 до 60 % правильных ответов; оценка «хорошо» - от 61 до 80 % правильных ответов; оценка «отлично» - от 81 до 100 % правильных ответов).

Тестовые задания открытого типа оцениваются по системе «зачтено/ не зачтено». Оценивается верность ответа по существу вопроса, при этом не учитывается порядок слов в словосочетании, верность окончаний, падежи.

Учебно-методическое пособие состоит из: введения, в котором определено место дисциплины в структуре ОПОП ВО; цель и планируемые результаты освоения дисциплины; виды текущего контроля, последовательность его проведения, критерии и нормы оценки (отметки); форма проведения промежуточной аттестации; критерии и нормы оценки (текущей и промежуточной аттестации);

основной части, которая содержит методические рекомендации к занятиям; тематический план лекционных занятий; методические указания к выполнению практических работ, типовые тестовые задания по дисциплине, вопросы для самоконтроля; заключения; список рекомендованных источников.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ЗАНЯТИЯМ

Осваивая курс «Теория горения и взрыва», студент должен научиться работать на лекциях, практических занятиях и организовывать самостоятельную работу. В начале лекции необходимо уяснить цель, которую лектор ставит перед собой и студентами. Важно внимательно слушать, отмечать наиболее существенную информацию и кратко ее конспектировать; укладывать новую информацию в собственную, уже имеющуюся, систему знаний. По ходу лекции необходимо подчеркивать новые термины, определения, устанавливать их взаимосвязь с изученными ранее понятиями. На лекциях рассматриваются теоретические вопросы дисциплины, контролируются результаты освоения учебного материала с помощью тестирования по окончании рассмотрения раздела.

Практическое занятие – это форма учебного занятия, где преподаватель организует детальное рассмотрение студентами отдельных теоретических положений учебной дисциплины и формирует умение и навыки их практического приложения путем индивидуального выполнения студентом в соответствии со сформулированными заданиями. Работа выполняется в отдельной тетради. На обложке необходимо указать название дисциплины, специальность, курс, фамилию и инициалы студента.

При выполнении задания необходимо строго придерживаться своего варианта. При выполнении расчетного задания условия задач переписываются в рабочую тетрадь полностью.

Формулы должны быть снабжены пояснениями всех используемых в них обозначений. В расчетной части задания необходимо придерживаться международной системы единиц СИ.

Подготовка к выполнению и выполнение расчетных заданий направлено на закрепление теоретического материала. В расчетных заданиях по индивидуальным исходным данным студенты проводят расчет теплоты горения, температуры горения, температуры самовоспламенения, температуры и давления в детонационном процессе горения, параметров волны давления при детонационном горении.

Самостоятельная работа должна осуществляться как на основе использования учебно-методической литературы, так и интернет-ресурсов. Самостоятельное изучение теоретического материала является элементом обучения самостоятельному приобретению новых знаний как одной из важнейших профессиональных компетенций.

ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН ЗАНЯТИЙ

Тема 1. Общие вопросы горения

Цель и задачи дисциплины. Место дисциплины в структуре образовательной программы. Планируемые результаты освоения дисциплины

Вопросы для обсуждения:

Развитие представлений о горении, место процесса горения в развитии цивилизации. Различные подходы к определению процесса горения. Физико-химические основы процесса горения. Понятие горючей смеси и горючей системы. Стадии процесса горения. Пространственное распространение, как характерная особенность процесса горения и механизмы распространения пламени. Детонация и дефлаграция. Понятие скорости горения. Основы классификации горючих смесей и процессов горения. Гомогенные и гетерогенные смеси. Влияние различных факторов на процесс горения.

Тема 2. Процесс горения в теплосиловых и теплоэнергетических установках

Вопросы для обсуждения:

Экологические аспекты процессов горения. Понятие горючей смеси. Горючая система ее состав и условия горения. Инициация процесса горения. Виды окислителя. Характеристики процесса горения: коэффициент горючести, характер свечения пламени. Горючие техногенные вещества. Классификация горючих веществ и смесей по составу и агрегатному состоянию. Уравнения горения веществ в кислороде и на воздухе, методика их составления. Соотношение горючего вещества и окислителя в системе. Классификация гомогенных смесей по соотношению горючего вещества и окислителя. Мольная доля горючего вещества; стехиометрический коэффициент реакции горения. Продукты сгорания и зависимость их состава от состава горючего вещества. Полное и неполное сгорание.

Тема 3. Расчет процесса горения: состав горючей смеси и расчет количества воздуха, необходимого для горения

Вопросы для обсуждения:

Расчетные параметры процесса горения. Задание состава горючего материала. Индивидуальные горючие вещества и горючие смеси. Топливо и его элементный состав. Рабочая, сухая, горючая и органическая массы топлива.

Условия пересчета масс. Процесс горения топлива. Расчет воздуха, необходимого для сгорания индивидуальных веществ в различном агрегатном состоянии. Условия горения, отличные от нормальных. Учет коэффициента избытка воздуха. Расчет воздуха, необходимого для сгорания сложных горючих смесей в различном агрегатном состоянии. Теоретически необходимое и действительное количество воздуха. Избыток воздуха и коэффициент избытка. Влияние температуры и давления на процесс горения. Соотношение продуктов сгорания и их состав при различных значениях коэффициента избытка воздуха.

Тема 4. Расчет процесса горения: расчет продуктов сгорания

Вопросы для обсуждения:

Продукты сгорания и их состав. Сухие и влажные продукты сгорания. Зависимость температуры горения и состава продуктов сгорания от количества окислителя. Горение органических веществ и продукты их сгорания. Полное и неполное сгорание смеси. Горение неорганических веществ и продукты их сгорания. Термоокислительные реакции и зависимость состава их продуктов от температуры. Расчет продуктов сгорания индивидуальных веществ в различных агрегатных состояниях при нормальных условиях и в условиях, отличных от нормальных. Расчет продуктов сгорания сложных горючих газообразных смесей. Особенности расчета продуктов сгорания сложных горючих смесей в жидком и твердом состоянии. Влияние внешних условий на состав и объем продуктов сгорания. Процентный состав продуктов сгорания и особенности его расчета для горючих смесей в различном агрегатном состоянии. Оценка условий горения по процентному составу продуктов сгорания.

Тема 5. Термодинамика процессов горения

Вопросы для обсуждения:

Тепловые эффекты реакций горения. Процессы, протекающие при горении в эндо- и экзотермических реакциях. Теплота горения и теплота сгорания веществ. Расчет теплоты сгорания на основании закона Гесса. Экспериментальное определение теплоты сгорания. Низшая и высшая теплоты сгорания. Формулы Менделеева для определения высшей и низшей теплоты сгорания веществ сложного состава. Расчет теплоты сгорания для веществ различного состава и агрегатных состояний. Нижний предел теплоты сгорания веществ. Температура горения и способы ее определения. Теоретическая температура горения. Адиабатическая (калориметрическая) температура горения. Расчет теплового содержания продуктов сгорания. Действительная температура горения. Распре-

деление температуры в зоне горения и ее зависимость от условий горения. Методики определения температуры горения.

Тема 6. Типы пламен и скорость горения

Вопросы для обсуждения:

Предварительно перемешанные и предварительно не перемешанные смеси горючих веществ с окислителем. Примеры. Структура пламени. Системы с различными типами пламен. Ламинарные пламена предварительно перемешанной смеси. Распространение плоского ламинарного пламени. Пламя бунзеновской горелки. Кинетическое горение. Зависимость скорости горения от направления потока. Фоторегистрация пламени. Ламинарные пламена предварительно неперемешанной смеси. Диффузионное горение. Горение свечи. Ламинарные пламена с параллельными потоками и противотоком. Пламена предварительно не перемешанной смеси с быстрыми реакциями. Турбулентные пламена. Модели турбулентности. Турбулентные пламена предварительно перемешанной смеси. Скорость распространения турбулентного пламени. Турбулентные пламена предварительно неперемешанной смеси. Особенности применения смесей различного типа.

Тема 7. Воспламенение и возгорание горючих смесей. Инициация процессов горения

Вопросы для обсуждения:

Действие источника воспламенения (зажигания) на горючую смесь. Искровое зажигание и его особенности: успешное зажигание, отказ от зажигания. Методы исследования параметров зажигания. Поведение смесей при искровом зажигании. Источники искрового зажигания: высоковольтная и низковольтная искра, их разновидности и особенности использования. Пределы зажигания. Охлаждающее действие электродов. Влияние состава горючей смеси на характеристики источника зажигания. Зажигание накаливаемой поверхностью. Влияние температуры и площади поверхности на процесс зажигания. Особенности процесса зажигания накаливаемой поверхностью: каталитические процессы, влияние природы металла. Процессы, протекающие при горении. Стадии горения веществ в различном агрегатном состоянии.

Теории самовоспламенения. Виды самовоспламенения и скорость процесса. Тепловыделение и теплоотвод, зависимость процесса самовоспламенения от этих характеристик. Анализ кривых теплового самовоспламенения. Цеп-

ное самовоспламенение. Температура самовоспламенения, ее зависимость от состава горючей смеси, начальной температуры и др. факторов. Период индукции и факторы, на него влияющие. Возгорание и воспламенение; температуры, характеризующие данные процессы.

Тема 8. Кинетика процессов горения

Вопросы для обсуждения:

Влияние различных факторов на скорость горения. Молекулярность и порядок реакций горения. Изменение концентрации во времени для реакций первого, второго и третьего порядка. Зависимость энергии активации от молекулярности реакций. Элементарные реакции процессов окисления различных горючих веществ. Экспериментальные исследования элементарных реакций. Поверхностные реакции.

Тема 9. Горение различных систем

Вопросы для обсуждения:

Теория горения газовых смесей. Работы Зельдовича. Температура и скорость распространения фронта пламени. Давление при взрыве газо- и паровоздушных смесей, температура взрыва. Концентрационные пределы распространения пламени, их определение и использование. Факторы, влияющие на концентрационные пределы распространения. Горение жидкостей. Температурные пределы воспламенения и температура вспышки. Скорость выгорания. Горение пылевоздушных смесей. Пожароопасность пылей. Теория горения аэрозвесей. Горение твердых веществ. Особенности состава, строения и процессов горения твердых веществ. Горение древесины. Горение металлов. Пиролиз полимерных материалов. Оценка пожарной опасности горючих веществ. Общая характеристика процессов, протекающих при нагревании и горении веществ в различном агрегатном состоянии. Избыточное давление при взрыве веществ в различном агрегатном состоянии.

Тема 10. Теории взрыва

Вопросы для обсуждения:

Детонационная волна. Коэффициент жесткости взрывных газов. Скорость детонационной волны, способы ее определения. Удельная энергия взрыва. Действие взрывных газов. Ударная волна. Теория ударных волн для газовых сред. Работы Ренкина и Гюгонио. Отражение волны. Работы Маха. Распределение

энергии при взрыве: энергия ударной волны, остаточная энергия, кинетическая и тепловая энергия осколков оболочки, кинетическая и тепловая энергия источника, излучение. Распространение взрыва. Кумулятивный эффект и его использование. Взрыв в воздухе. Параметры ударной волны при взрыве в воздухе. Давление на фронте ударной волны. Скорость, время действия и импульс ударной волны.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

Практическое занятие № 1.

Тема: «Расчет коэффициента горючести».

Цель: научиться определять коэффициент горючести.

Теоретическая часть:

Производственные предприятия могут содержать различные вещества, материалы, представляющие потенциальную опасность. Так, многие химические соединения способны гореть, и их воспламенение может привести к пожару. Поэтому необходимо уметь определять возможность горения определенного вещества. Так, все индивидуальные вещества могут быть охарактеризованы коэффициентом горючести.

Коэффициент горючести **К** является безразмерным коэффициентом и служит для определения горючести вещества. Рассчитанный коэффициент горючести может быть использован для приближенного вычисления температуры вспышки вещества, а также величины нижнего концентрационного коэффициента распространения пламени.

Для расчета коэффициента горючести можно использовать следующую формулу:

$$K = 4 \cdot n(C) + 4 \cdot n(S) + n(H) + n(N) - 2 \cdot n(O) - 2 \cdot n(Cl) - 3 \cdot n(F) - 5 \cdot n(Br), \quad (1.1)$$

где $n(C)$, $n(S)$, $n(H)$, $n(N)$, $n(O)$, $2 \cdot n(Cl)$, $n(F)$, $n(Br)$ – число атомов соответственно углерода, серы, водорода, азота, кислорода, хлора, фтора и брома в молекуле вещества.

Если коэффициент горючести **К** больше или равен единице ($K \geq 1$), то вещество является **горючим**.

При значении **К** меньше единицы ($K < 1$) – вещество **негорючее**.

Пример. Рассчитать коэффициент горючести глюкозы $C_6H_{12}O_6$ и угольной кислоты H_2CO_3 .

Решение.

1. В молекуле глюкозы содержится атомов:

углерода $n(C) = 6$; водорода $n(H) = 12$; кислорода $n(O) = 6$.

Подставляя количество атомов в формулу 1.1, имеем

$$K = 4 \cdot 6 + 12 - 2 \cdot 6 = 24.$$

$K > 1$, следовательно, глюкоза – горючее вещество.

2. В молекуле угольной кислоты $n(H) = 2$; $n(Cl) = 1$;

$$n(O) = 3; \quad K = 2 + 4 - 2 \cdot 3 = 0.$$

$K < 1$, следовательно, угольная кислота – негорючее вещество.

Задание для самостоятельной работы

Задача 1. Рассчитать коэффициент горючести приведенных веществ (табл. 1).

Таблица 1

Задание к задаче 1.

№ вар	Вещества	
1	метионин $C_5H_{11}NO_2S$	азотная кислота HNO_3
2	сахароза $C_{12}H_{22}O_{11}$	щавелевая кислота $H_2C_2O_4$
3	дихлорэтилен $C_2H_4Cl_2$	лимонная кислота $C_6H_8O_7$
4	дихлорметан CH_2Cl_2	уксусная кислота $C_2H_4O_2$
5	глутамин $C_5H_{10}N_2O_3$	хлорметан CH_3Cl
6	аспартам $C_{14}H_{18}N_2O_5$	фосген $COCl_2$
7	хинин $C_{20}H_{24}O_2N_2$	серная кислота H_2SO_4
8	аспарагин $C_4H_8N_2O_3$	хлорметан CH_3Cl
9	нитробензол $C_6H_5NO_2$	сероуглерод CS_2
10	анилин $C_6H_5NH_2$	метан CH_4
11	мочевина NH_2CONH_2	диоксид хлора ClO_2
12	винная кислота $H_2C_4H_4O_6$	сернистая кислота H_2SO_3
13	формаид $HCONH_2$	хлористая кислота $HClO_2$
14	глицин $C_2H_5NO_2$	циклогексан C_6H_{12}
15	бутиловый спирт C_4H_9OH	ацетилен C_2H_2
16	диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$	толуол C_7H_8
17	фенол C_6H_5OH	кетен CH_2CO
18	нитрат аммония NH_4NO_3	антрацен $C_{14}H_{10}$
19	стеариновая кислота $C_{18}H_{36}O_2$	этилен C_2H_4
20	диметилсульфид CH_3SCH_3	бензол C_6H_6

Практическое занятие № 2.

Тема: «Составление уравнений реакций горения в кислороде и в воздухе».

Расчет молей (кмолей) исходных веществ и продуктов реакции по уравнению реакции горения».

Цель: научиться составлять уравнения реакций горения в кислороде и в воздухе, рассчитывать количество молей исходных веществ и продуктов реакции.

Теоретическая часть:

1. Составление уравнений реакций горения в кислороде.

Составляя уравнение реакции горения, следует помнить, что в пожарно-технических расчетах принято все величины относить к 1 молю горючего вещества. Это, в частности, означает, что в уравнении реакции горения перед горючим веществом коэффициент всегда равен 1.

В таблице 2 приведены элементы, входящие в состав горючего вещества, и вещества, образующиеся в результате сгорания.

Таблица 2

Состав продуктов горения от состава исходного вещества

Элементы, входящие в состав горючего вещества	Продукты горения
Углерод С	Углекислый газ CO_2
Водород Н	Вода H_2O
Сера S	Оксид серы (IV) SO_2
Азот N	Молекулярный азот N_2
Фосфор Р	Оксид фосфора (V) P_2O_5
Галогены F, Cl, Br, I	Галогеноводороды HCl , HF , HBr , HI

Коэффициенты, стоящие в уравнении реакции, называются **стехиометрическими коэффициентами** и показывают, сколько молей (кмолей) веществ участвовало в реакции или образовалось в результате реакции.

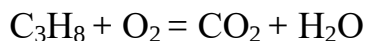
Стехиометрический коэффициент, показывающий число молей кислорода, необходимое для полного сгорания вещества, обозначается буквой **В**.

Пример. Составить уравнение реакции горения в кислороде пропана C_3H_8 , глицерина $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$, аммиака NH_3 , сероуглерода CS_2 .

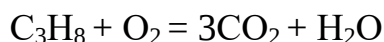
Решение.

Горение пропана в кислороде

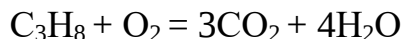
1. Записываем реакцию горения



2. В молекуле пропана 3 атома углерода, из них образуется 3 молекулы углекислого газа



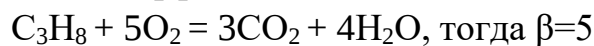
3. Атомов водорода в молекуле пропана 8, из них образуется 4 молекулы воды



4. Подсчитаем число атомов кислорода в правой части уравнения

$$2 \cdot 3 + 4 = 10$$

5. В левой части уравнения также должно быть 10 атомов кислорода. Молекула кислорода состоит из двух атомов, следовательно, перед кислородом нужно поставить коэффициент 5.



2. Составление уравнений реакций горения в воздухе

Чаще всего в условиях пожара горение протекает не в среде чистого кислорода, а в воздухе. Воздух состоит из азота (78 %), кислорода (21 %), окислов азота, углекислого газа, инертных и других газов (1 %). Для проведения расчетов принимают, что в воздухе содержится 79 % азота и 21 % кислорода. Таким образом, на один объем кислорода приходится 3,76 объемов азота ($79 : 21 = 3,76$).

В соответствии с законом Авогадро, соотношение молей этих газов будет $1 : 3,76$. Таким образом, можно записать, что **молекулярный состав воздуха** ($\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2$).

Составление реакций горения веществ в воздухе аналогично составлению реакций горения в кислороде. Особенность состоит только в том, что азот воздуха при температуре горения ниже 2000°C в реакцию горения не вступает и выделяется из зоны горения вместе с продуктами горения.

Пример. Составить уравнение реакции горения в воздухе водорода H_2 , анилина $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$, пропанола $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$, угарного газа CO .

Решение.

Горение водорода в воздухе $\text{H}_2 + 0,5 \cdot (\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2) = \text{H}_2\text{O} + 0,5 \cdot 3,76\text{N}_2$, т.е. $\beta = 0,5$

Обратите внимание, что стехиометрический коэффициент перед кислородом 0,5 необходимо поставить и в правой части уравнения перед азотом.

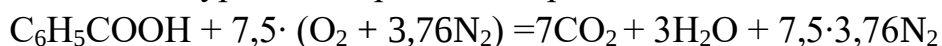
3. Расчет молей (киломолей) исходных веществ и продуктов реакции по уравнению реакции горения

В процессах горения исходными веществами являются горючее вещество и окислитель, а конечными – продукты горения.

Пример. Сколько молей исходных веществ участвовало в реакции и сколько молей продуктов горения образовалось при полном сгорании 1 моля бензойной кислоты C_6H_5COOH ?

Решение.

1. Запишем уравнение реакции горения бензойной кислоты.



2. Исходные вещества:

1 моль бензойной кислоты;

7,5 молей кислорода;

7,5·3,76 молей азота.

Газов воздуха всего 7,5·4,76 молей.

Всего (1 + 7,5·4,76) молей исходных веществ.

3. Продукты горения:

7 молей углекислого газа;

3 моля воды; 7,5·3,76 моля азота.

Всего (7 + 3 + 7,5·3,76) молей продуктов горения.

Аналогичные соотношения и в том случае, когда сгорает 1 кмоль бензойной кислоты.

Смеси сложных химических соединений или вещества сложного элементного состава нельзя выразить химической формулой, их состав выражается чаще всего в процентном содержании каждого элемента. К таким веществам можно отнести, например, нефть и нефтепродукты, древесину и многие другие органические вещества.

Задание для самостоятельной работы

Задача 2. Составить уравнения реакции горения в кислороде и в воздухе данного вещества, и определить, сколько молей исходных веществ участвовало в реакции и сколько молей продуктов горения образовалось при полном сгорании вещества. Исходные данные по вариантам приведены в табл. 3.

Таблица 3

Задание к задаче 2

№ вар.	Вещество
1	ацетилен C_2H_2
2	нитробензол $C_6H_5NO_2$
3	толуол C_7H_8

№ вар.	Вещество
4	метан CH_4
5	этанол $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$
6	бензол C_6H_6
7	диэтиловый эфир $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$
8	бутан C_4H_{10}
9	пентанол $\text{C}_5\text{H}_{11}\text{OH}$
10	фенол $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$
11	ксилол C_8H_{10}
12	этилен C_2H_4
13	этиловый эфир уксусной кислоты $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$
14	бутилен C_4H_8
15	метанол CH_3OH
16	формальдегид CH_2O
17	дихлорэтилен $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$
18	винилхлорид $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$
19	хлорид аммония NH_4Cl
20	бромэтан $\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$

Практическое занятие № 3.

Тема: «Расчет объема воздуха, необходимого для горения индивидуального вещества».

Цель: научиться рассчитывать объем воздуха, необходимого для горения индивидуального вещества.

Теоретическая часть:

Расчет объема воздуха, необходимого для горения.

Расчет объема воздуха, необходимого для горения, предполагает вычисление:

- теоретического объема воздуха $V_{в теор}$;
- практического объема воздуха $V_{в пр}$, затраченного на горение (с учетом коэффициента избытка воздуха).

Стехиометрическое количество воздуха в уравнении реакции горения предполагает, что при данном соотношении компонентов, участвующих в реакции горения, воздух расходуется полностью. Объем воздуха в данном случае называется **теоретическим** ($V_{в теор}$).

Горение может происходить не только при стехиометрическом соотношении компонентов, но и при значительном отклонении от него. Как правило, в условиях пожара на сгорание вещества воздуха затрачивается больше, чем определяется теоретическим расчетом. Избыточный воздух $\Delta V_{\text{в}}$ в реакции горения не расходуется, и удаляется из зоны реакции вместе с продуктами горения. Таким образом, практический объем воздуха равен

$$V_{\text{в}}^{\text{np}} = V_{\text{в}}^{\text{теор}} + \Delta V_{\text{в}} \quad (1.2)$$

и, следовательно, **избыток воздуха** будет равен

$$\Delta V_{\text{в}} = V_{\text{в}}^{\text{np}} - V_{\text{в}}^{\text{теор}} \quad (1.3)$$

Обычно в расчетах избыток воздуха при горении учитывается с помощью **коэффициента избытка воздуха (α)**. Коэффициент избытка воздуха показывает, во сколько раз в зону горения поступило воздуха больше, чем это теоретически необходимо для полного сгорания вещества.

$$\Delta V_{\text{в}} = V_{\text{в}}^{\text{теор}}(\alpha - 1) \quad (1.4)$$

Величина **α является** важной характеристикой машин и агрегатов, в которых осуществляется организованное горение.

Для горючих смесей стехиометрического состава (т.е. состава, соответствующего уравнению реакции горения) коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1$, при этом реальный расход воздуха равен теоретическому. В этом случае обеспечивается оптимальный режим горения.

Почти всегда **α несколько** больше единицы и находится в интервале значений 1,02–1,3 в зависимости от характера сжигаемого вещества. Именно этим обусловлено название коэффициента α – коэффициент *избытка* воздуха. В действительности для кинетического горения его значения могут быть как больше, так и меньше 1.

При $\alpha > 1$ горючую смесь называют *бедной по горючему компоненту*, а при $\alpha < 1$ – *богатой по горючему компоненту*. В технике эти понятия имеют очень большое значение для правильного управления организованным горением (двигатели внутреннего сгорания, теплогенерирующие агрегаты и т.д.).

Избыток воздуха имеется только в смеси, бедной по горючему компоненту. Из формул (1.3) и (1.4) следует

$$\Delta V_{\text{в}} = V_{\text{в}}^{\text{теор}}(\alpha - 1) \quad (1.5)$$

Для неорганизованного горения характерен диффузионный режим горения, поэтому большинство горючих материалов на пожаре могут гореть только в этом режиме. Однородные смеси могут образовываться и при реальном пожаре, однако их образование, скорее, предшествует пожару или обеспечивает начальную стадию развития.

Если происходит открытый пожар, то понятия «избыток» - «недостаток» воздуха приобретают абсурдный смысл. В закрытом объеме диффузионное горение большинства горючих материалов возможно только до определенной пороговой концентрации кислорода, так называемой **остаточной концентрации кислорода в продуктах горения $N\phi(O_2)^{ПГ}$** . Для большинства органических веществ она составляет 12–16% O_2 . Для некоторых веществ, например ацетилена C_2H_2 , ряда металлов, горение возможно и при значительно меньшем содержании кислорода (до 5 % объемных O_2).

Коэффициент избытка воздуха для диффузионного горения правильнее назвать **коэффициент участия воздуха в горении**. Эта характеристика более полно отражает суть процесса горения на пожаре и не дает ошибочных представлений и понятий. Это важный параметр, определяющий динамику развития пожара и, как следствие, развитие его опасных факторов.

Зная содержание кислорода в продуктах горения, можно определить коэффициент избытка воздуха (коэффициент участия воздуха в горении) на реальном пожаре:

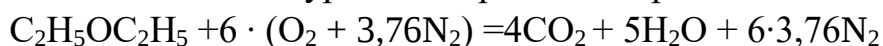
$$\alpha = 21/21\phi(O_2)^{ПГ} \quad (1.6)$$

Анализ уравнения (1.6) показывает, что α не может быть меньше 1, и, в среднем, для диффузионных режимов горения находится в интервале от 2 до 5.

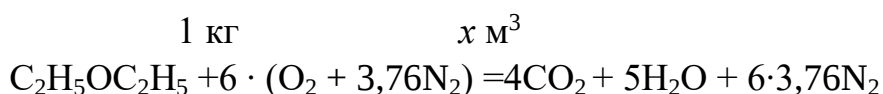
Пример. Какой теоретический объем воздуха необходим для полного сгорания 1 кг диэтилового эфира $C_2H_5OC_2H_5$? Температура 10 °С, давление 1,2 атм.

Решение.

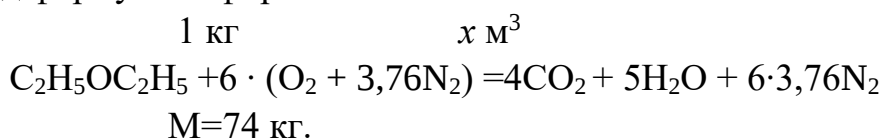
1. Записываем уравнение реакции горения



Записываем в уравнении известные и неизвестные величины с указанием размерности.



Молярная масса диэтилового эфира 74 кг/кмоль. Записываем эту величину под формулой эфира.



2. При нормальных условиях молярный объем (V_M) любого газообразного вещества составляет 22,4 л/моль или 22,4 м³/кмоль.

Если условия отличаются от нормальных, то необходимо определить, какой объем будет занимать 1 кмоль любого газообразного вещества при данных условиях. Расчет V_M ведут по формуле объединенного газового закона:

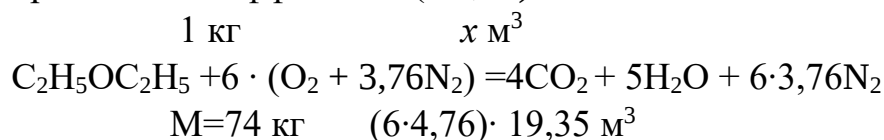
$$V_M = \frac{P_0 \cdot V_0}{T_0} \cdot \frac{T}{P}$$

где P и T – данные в задаче температура и давление.

Рассчитаем, какой объем занимает 1 кмоль воздуха (как и любого другого газообразного вещества) при данных температуре и давлении.

$$1. \quad V_M = \frac{P_0 \cdot V_0}{T_0} \cdot \frac{T}{P} = \frac{1 \cdot 22,4}{273} \cdot \frac{283}{1,2} = 19,35 \text{ м}^3/\text{кмоль}.$$

Записываем данную величину под формулой воздуха, умножив её на стехиометрический коэффициент (6·4,76).



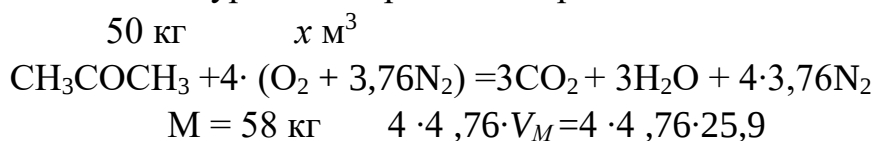
По уравнению реакции найдем пропорционально теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания эфира

$$V_{\text{г}}^{\text{тп}} = 7,5 \text{ м}^3$$

Пример. Какой объем воздуха необходим для полного сгорания 50 кг ацетона CH_3COCH_3 при температуре 23 °С и давлении 95 кПа, если горение протекало с коэффициентом избытка воздуха 1,2?

Решение.

1. Записываем уравнение реакции горения



2. Рассчитаем, какой объем занимает 1 кмоль воздуха (как и любого другого газообразного вещества) при данных температуре и давлении.

$$V_M = \frac{P_0 \cdot V_0}{T_0} \cdot \frac{T}{P} = \frac{101,3 \cdot 22,4}{273} \cdot \frac{296}{95} = 25,9 \text{ м}^3/\text{кмоль}.$$

3. По уравнению реакции найдем теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания эфира:

$$V_{\text{г}}^{\text{теор}} = 425,1 \text{ м}^3$$

4. По условию задачи коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,2$

С учетом этого определим практический объем воздуха, необходимый для горения:

$$V_{\text{г}}^{\text{тп}} = V_{\text{г}}^{\text{теор}} \cdot \alpha = 425,1 \cdot 1,2 = 510,1 \text{ м}^3.$$

Задание для самостоятельной работы

Задача 3. Какой теоретический объем воздуха необходим для полного сгорания m кг вещества, при заданной температуре и давлении? Исходные данные по вариантам приведены в табл. 4.

Задание к задаче 3

№ вар.	Вещество	Масса, кг	Температура, °C	Давление, атм
1	ацетилен C_2H_2	1	11	1,2
2	нитробензол $C_6H_5NO_2$	2	12	1,2
3	толуол C_7H_8	3	13	1,2
4	метан CH_4	4	14	1,2
5	этанол C_2H_5OH	5	15	1,2
6	бензол C_6H_6	6	16	1,3
7	диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$	7	17	1,3
8	бутан C_4H_{10}	8	18	1,3
9	пентанол $C_5H_{11}OH$	9	19	1,3
10	фенол C_6H_5OH	10	20	1,3
11	ксилол C_8H_{10}	11	21	1,4
12	этилен C_2H_4	12	22	1,4
13	этиловый эфир уксусной кислоты $C_4H_8O_2$	13	23	1,4
14	бутилен C_4H_8	14	24	1,4
15	метанол CH_3OH	15	25	1,4
16	формальдегид CH_2O	16	8	1,1
17	дихлорэтилен $C_2H_4Cl_2$	17	9	1,1
18	винилхлорид C_2H_3Cl	18	10	1,1
19	хлорид аммония NH_4Cl	19	11	1,1
20	бромэтан C_2H_5Br	20	12	1,1

Практическое занятия № 4.

Тема: «Расчет объема воздуха, необходимого для горения газовой смеси».

Цель: научиться рассчитывать объем воздуха, необходимого для горения газовой смеси.

Теоретическая часть:

Природный, попутный нефтяной газ, промышленные газы (доменный, коксовый, генераторный и т.п.) представляют собой смеси газов. Состав газов

выражается обычно в объемных процентах (ϕ объемн, %). Алгоритм расчета, в данном случае, следующий: для каждого горючего компонента вычисляется теоретическое количество воздуха с учетом его концентрации в смеси, и полученные концентрации суммируются. Формула для расчета теоретического объема воздуха для сгорания газовой смеси имеет следующий вид:

$$V_{\text{в теор.}} = \frac{\beta_1 \cdot \phi_1 + \beta_2 \cdot \phi_2 + \beta_3 \cdot \phi_3 + \dots}{21} \cdot V_{\text{гс}} \quad (2.1)$$

где $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – стехиометрические коэффициенты при воздухе в уравнении реакции горения для каждого горючего компонента газовой смеси;

ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 – концентрации каждого горючего компонента смеси (в объемных %);

$\phi(\text{O}_2)$ – процентное содержание кислорода в горючем газе (в объемных %);

$V_{\text{гс}}$ – объем газовой смеси, м^3 .

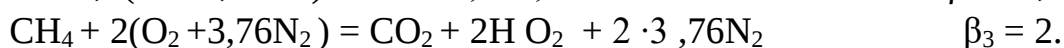
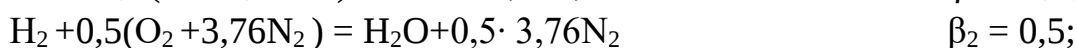
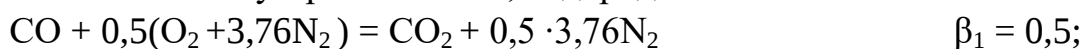
Если горение протекает с избытком воздуха, то практический объем воздуха рассчитывают по уже известной формуле

$$V_{\text{в пр}} = V_{\text{в теор}} \cdot \alpha$$

Пример. Определить объем воздуха, необходимого для полного сгорания 10 м^3 доменного газа следующего состава (в % объемных): оксид углерода (II) CO – 27 %; водород H_2 – 3 %; углекислый газ CO_2 – 13 %; метан CH_4 – 1 %; азот N_2 – 56 %. Горение протекает при $\alpha = 1,3$.

Решение.

1. Определяем стехиометрические коэффициенты в уравнении реакции горения для каждого горючего компонента газовой смеси. Горючими газами в этой смеси являются угарный газ CO , водород H_2 и метан CH_4 .



2. По формуле (2.1) определяем теоретический объем воздуха, необходимый для горения данной газовой смеси:

3.

$$V_{\text{теор}} = \frac{0,5 \cdot 27 + 0,5 \cdot 3 + 2 \cdot 1}{21} = 8,1 \text{ м}^3$$

3. С учетом коэффициента избытка воздуха реально на сгорание данной газовой смеси будет затрачено воздуха

$$V_{\text{в пр}} = V_{\text{теор}} \cdot \alpha = 8,1 \cdot 1,3 = 10,5 \text{ м}^3.$$

Задание для самостоятельной работы

Задача 4. Определить объем воздуха, необходимого для полного сгорания $x \text{ м}^3$ данной горючей газовой смеси имеющегося состава. Горение протекает при коэффициенте избытка воздуха α . Исходные данные по вариантам приведены в таблице 5.

Таблица 5

Задание к задаче 4

№ вар.	Газовая смесь	Состав газовой смеси, %	Объем газовой смеси, м^3	Коэффициент избытка воздуха, α
1	Доменный газ	оксид углерода (II) CO – 27 %, водород H_2 – 3 %, углекислый газ CO_2 – 13 %, метан CH_4 – 1 %, азот N_2 – 56 %	15	1,2
2	Водяной газ	оксид углерода (II) CO – 3 %, водород H_2 – 50 %, углекислый газ CO_2 – 10 %, метан CH_4 – 5 %, азот N_2 – 6 %	20	1,1
3	Водяной газ	оксид углерода (II) CO – 35 %, водород H_2 – 40 %, углекислый газ CO_2 – 5 %, метан CH_4 – 14 %, азот N_2 – 6 %	100	1,2
4	Водяной газ	оксид углерода (II) CO – 40 %, водород H_2 – 50 %, углекислый газ CO_2 – 4 %, метан CH_4 – 1 %, азот N_2 – 5 %	60	1,3
5	Природный газ	водород H_2 – 4 %, метан CH_4 – 86 %, этан C_2H_6 – 2 %, пропан C_3H_8 – 4 %, бутан C_4H_{10} – 4 %	80	1,4
6	Природный газ	метан CH_4 – 90 %, углекислый газ CO_2 – 1 %, азот N_2 – 1 %, этан C_2H_6 – 5 %, пропан C_3H_8 – 4 %	90	1,4
7	Светильный газ	оксид углерода (II) CO – 10 %, водород H_2 – 50 %, метан CH_4 – 30 %, углекислый газ CO_2 – 3 %, кислород O_2 – 2 %, азот N_2 – 5 %	85	1,5
8	Светильный газ	оксид углерода (II) CO – 20 %, водород H_2 – 50 %, метан CH_4 – 23 %, углекислый газ CO_2 – 3 %, азот N_2 – 2 %, этан C_2H_6 – 2 %	35	1,0
9	Коксовый газ	оксид углерода (II) CO – 7 %, водород H_2 – 57 %, метан CH_4 – 22 %, углекислый газ CO_2 – 2 %, азот N_2 – 8 %, вода H_2O – 4 %	45	1,1
10	Саратовский природный газ	метан CH_4 – 92 %, этан C_2H_6 – 8 %	50	1,1

№ вар.	Газовая смесь	Состав газовой смеси, %	Объем газовой смеси, м ³	Коэффициент избытка воз- духа, α
11	Ухтинский природный газ	метан CH_4 – 88 %, углекислый газ CO_2 – 4 %, азот N_2 – 5 %, этан C_2H_6 – 2 %, пропан C_3H_8 – 1 %, бутан C_4H_{10} – 1 %	65	1,1
12	Дашавский природный газ	метан CH_4 – 98 %, азот N_2 – 1 %, этан C_2H_6 – 1 %, пропан C_3H_8 – 1 %	85	1,2
13	Попутный нефтяной газ	метан CH_4 – 42 %, азот N_2 – 8 %, этан C_2H_6 – 20 %, пропан C_3H_8 – 20 %, бутан C_4H_{10} – 10 %	70	1,4
14	Шебелинский природный газ	метан CH_4 – 92 %, углекислый газ CO_2 – 2 %, азот N_2 – 2 %, этан C_2H_6 – 3 %, пропан C_3H_8 – 2 %, бутан C_4H_{10} – 1 %	75	1,5
15	Генераторный газ	оксид углерода (II) CO – 30 %, водород H_2 – 15 %, метан CH_4 – 5 %, углекислый газ CO_2 – 10 %, азот N_2 – 40 %	55	1,3
16	Воздушный газ	оксид углерода (II) CO – 33 %, водород H_2 – 10 %, метан CH_4 – 1 %, углекислый газ CO_2 – 1 %, азот N_2 – 55 %	40	1,3
17	Бухарский газ	метан CH_4 – 95 %, углекислый газ CO_2 – 1 %, азот N_2 – 1 %, этан C_2H_6 – 4 %	30	1,0
18	Сжиженный газ	метан CH_4 – 4 %, этан C_2H_6 – 4 %, пропан C_3H_8 – 79 %, бутан C_4H_{10} – 11 %	25	1,1
19	Биогаз	водород H_2 – 1 %, метан CH_4 – 70 %, углекислый газ CO_2 – 28 %, азот N_2 – 1 %, сероводород H_2S – 1 %	95	1,6
20	Коксовый очищенный газ	оксид углерода (II) CO – 7 %, водород H_2 – 58 %, метан CH_4 – 22 %, углекислый газ CO_2 – 2 %, кислород O_2 – 1 %, азот N_2 – 8 %, этан C_2H_6 – 2 %, сероводород H_2S – 1 %	110	1,3

Практическое занятия № 5.

Тема: «Расчет объема воздуха, необходимого для горения вещества сложного элементного состава».

Цель: научиться рассчитывать объем воздуха, необходимого для горения вещества сложного элементного состава.

Теоретическая часть:

Состав веществ сложного элементного состава выражается в массовых долях (ω , %) каждого элемента. При горении кислород воздуха расходуется на окисление углерода С, водорода Н, серы S и других горючих составляющих.

Рассчитаем, какой теоретический объем воздуха необходим для сгорания 1 кг каждого элемента при нормальных условиях.

Углерод, водород и сера являются основными составляющими большинства органических соединений. Значительное число органических веществ имеют в своем составе кислород, и, следовательно, воздуха на горение будет затрачено меньше.

Теоретическое количество воздуха для сгорания 1 кг вещества сложного элементного состава в общем виде можно записать следующим образом:

$$V_{\text{в}}^{\text{теор}} = V_{\text{в}}(\text{C})^{\text{теор}} \cdot \frac{\omega(\text{C})}{100} + V_{\text{в}}(\text{H})^{\text{теор}} \cdot \frac{\omega(\text{H})}{100} + V_{\text{в}}(\text{S})^{\text{теор}} \cdot \frac{\omega(\text{S})}{100} - V_{\text{в}}(\text{O})^{\text{теор}} \cdot \frac{\omega(\text{O})}{100} \quad \text{м}^3 \quad (2.2)$$

где $\omega(\text{C})$, $\omega(\text{H})$, $\omega(\text{S})$, $\omega(\text{O})$ – массовые доли элементов в веществе, %.

После подстановки в формулу (2.2) полученных выше расчетных значений теоретический объем воздуха для сгорания заданной массы (m) вещества сложного элементного состава при нормальных условиях определяется по формуле

$$V_{\text{в}}^{\text{теор}} = m \cdot 0,267 \cdot \left(\frac{\omega(\text{C})}{3} + \omega(\text{H}) + \frac{\omega(\text{S})}{8} - \frac{\omega(\text{O})}{8} \right) \text{ м}^3/\text{кг} \quad (2.3)$$

Пример. Определить объем воздуха, необходимого для полного сгорания 5 кг торфа следующего состава (в %): С – 56,4 %; Н – 5,04 %; О – 24,0 %; S – 0,06 %; N – 3,6 %; зола – 10,9 %. Горение протекает при $\alpha=1,5$, условия нормальные.

Решение.

1. По формуле (2.3) определяем теоретический объем воздуха, необходимый для горения данной массы образца торфа:

2.

$$V_{\text{в}}^{\text{теор}} = m \cdot 0,267 \cdot \left(\frac{\omega(56,4)}{3} + \omega(5,04) + \frac{\omega(0,06)}{8} - \frac{\omega(24)}{8} \right) = 27,7 \text{ м}^3$$

С учетом коэффициента избытка воздуха реально на сгорание данной массы образца торфа будет затрачено воздуха

$$V_{\text{в}}^{\text{пр}} = V_{\text{в}}^{\text{теор}} \cdot \alpha = 27,7 \cdot 1,5 = 41,6 \text{ м}^3.$$

Задание для самостоятельной работы.

Задача 5. Определить объем воздуха, необходимого для полного сгорания заданной массы вещества сложного элементного состава при нормальных условиях и коэффициенте избытка воздуха α . Исходные данные по вариантам приведены в таблице 6.

Таблица 6

Задание к задаче 5.

№ вар	Название вещества	Мас- са, кг	Кэф- фициент избытка воздуха α	Состав вещества, %						
				С	Н	О	N	S	Влага	Зола
1	Каменный уголь	6	1,4	76,0	4,8	3,6	2,8	1,8	2,8	8,2
2	Мазут	8	1,3	85,0	14,0	0,4	0,3	0,3	-	
3	Древесина	7	1,2	46,0	6,0	42,0	-	-	6,0	-
4	Торф	9	1,5	36,0	4,0	12,0	8,0	-	35,0	-5,0
5	Нефть	10	1,4	84,0	14,0	-	1,0	1,0	-	-
6	Каменный уголь	5	1,3	79,4	5,3	10,3	-	2,82	-	2,18
7	Керосин	6	1,2	85,28	14,12	0,6	-	-	-	-
8	Древесина	7	1,4	41,5	6,0	43,0	2,0	-	7,5	-
9	Полуантрацит	8	1,2	90,4	4,3	4,3	-	1,0	-	-
10	Торф	9	1,0	43,0	7,0	41,0	2,0	-	7,0	-
11	Каменный уголь	10	1,2	83,4	10,0	0,1	0,3	2,9	3,0	0,3
12	Мазут	11	1,2	83,4	10,0	0,1	0,3	2,9	3,0	0,3
13	Уголь	12	1,3	75,0	4,0	6,0	3,0	2,0	4,0	6,0
14	Сланец	4	1,4	38,8	3,2	4,0	0,1	1,5	15,0	37,4
15	Уголь	3	1,5	37,2	2,6	12,0	0,4	0,6	40,0	7,2

16	Бензин	2	1,6	85,0	14,9	0,02	0,03	0,15	-	-
17	Уголь	1	1,7	29,1	2,2	8,7	0,6	2,9	33,0	23,5
18	Березовский уголь	5	1,2	44,3	3,0	14,4	0,4	0,2	33,0	4,7
19	Мазут мало-сернистый	6	1,3	85,8	8,7	0,4	0,4	0,7	3,8	0,2
20	Мазут высокосернистый	7	1,4	83,7	11,5	0,5	-	0,4	-	0,3

Практическое занятие № 6.

Тема: «Расчет объема и процентного состава продуктов горения индивидуального вещества».

Цель: научиться рассчитывать объем и процентный состав продуктов горения индивидуальных веществ.

Теоретическая часть:

Практически всегда органические вещества горят с образованием продуктов полного и неполного горения.

К **продуктам полного сгорания** относятся: углекислый газ, образующийся при горении углерода, разложении карбонатов; водяной пар, образующийся при горении водорода и испарении влаги в исходном веществе; оксид серы (IV) SO_2 и азот – продукты горения соединений, содержащих серу и азот.

Продукты неполного сгорания – угарный газ CO (оксид углерода (II)), сажа, C, продукты термоокислительного разложения – смолы.

Неорганические вещества сгорают, как правило, до соответствующих оксидов.

Выход продуктов горения количественно установить невозможно из-за чрезвычайной сложности их состава, поэтому материальный баланс процесса горения рассчитывается из предположения, что вещество сгорает полностью до конечных продуктов. При этом в состав продуктов горения включают также азот воздуха, израсходованного на горение, и избыток воздуха при $\alpha > 1$.

Как и в случае расчета объема воздуха, необходимого для горения, свои особенности имеет расчет продуктов горения для индивидуальных веществ, смеси газов и веществ с известным элементным составом.

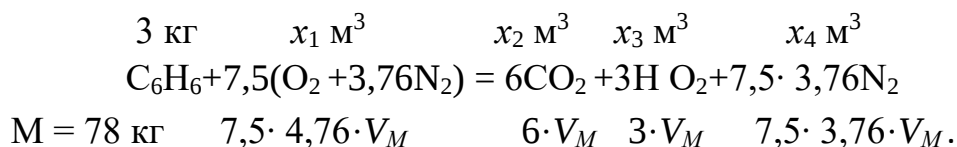
В случае индивидуального химического соединения объем и состав продуктов горения рассчитывается по уравнению реакции горения.

Следует обратить внимание, что более половины объема всех продуктов горения – это азот воздуха, израсходованного на горение. Если же горение протекает с коэффициентом избытка воздуха $\alpha > 1$, то избыточный воздух также составляет значительную часть продуктов горения.

Пример. Определить объем и состав в объемных % продуктов горения, образовавшихся при сгорании 3 кг бензола C_6H_6 . Температура 20 °С, давление 770 мм рт ст., коэффициент избытка воздуха $\alpha=1,4$.

Решение.

1. Записываем уравнение реакции горения и вписываем все известные и неизвестные величины:



2. Рассчитаем, какой объем занимает 1 кмоль газообразных веществ при заданных температуре и давлении.

$$V_M = \frac{P_0 \cdot V_0}{T_0} \cdot \frac{T}{P} = \frac{760 \cdot 22,4}{273} \cdot \frac{293}{770} = 23,7 \text{ м}^3/\text{кмоль}.$$

3. Теоретический объем продуктов горения (V_{III}) определяем по уравнению реакции

$$V_{III} = \frac{3 \cdot (6 + 3 + 7,5 \cdot 3,76) \cdot 23,7}{78} = 33,9 \text{ м}^3$$

4. Горение протекает с коэффициентом избытка воздуха, следовательно, в состав продуктов горения войдет избыточный воздух ΔV_e .

Для расчета избытка воздуха по уравнению реакции найдем теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания бензола:

$$V_{\text{теор}} = x_1 = \frac{3 \cdot 7,5 \cdot 4,76 \cdot 23,7}{78} = 32,5 \text{ м}^3$$

Избыток воздуха определим по формуле

$$\Delta V_e = V_{\text{теор}} \cdot (\alpha - 1) = 32,5 \cdot (1,4 - 1) = 13 \text{ м}^3$$

С учетом избытка воздуха практический объем продуктов горения составит

$$V_{III}^* = V_{III} + \Delta V_e = 33,9 + 13 = 46,9 \text{ м}^3$$

5. Иногда возникает необходимость рассчитать объем отдельных компонентов продуктов горения и их процентный состав.

В этом случае по уравнению реакции определяем объем CO_2 , H_2O и N_2 .

$$V(CO_2) = x_2 = \frac{3 \cdot 6 \cdot 23,7}{78} = 5,47 \text{ м}^3$$

$$V(H_2O) = x_3 = \frac{3 \cdot 3 \cdot 23,7}{78} = 2,73 \text{ м}^3$$

$$V(N_2) = x_4 = \frac{3 \cdot 7,5 \cdot 3,76 \cdot 23,7}{78} = 25,71 \text{ м}^3$$

$$\Delta V_e = 13 \text{ м}^3.$$

Объемная концентрация каждого компонента смеси рассчитывается следующим образом:

$$\varphi^{об} (CO_2) = \frac{V(CO_2) \cdot 100}{V_{III}^*} = \frac{5,47 \cdot 100}{46,9} = 11,7 \%;$$

$$\varphi^{об} (H_2O) = \frac{V(H_2O) \cdot 100}{V_{III}^*} = \frac{2,73 \cdot 100}{46,9} = 5,8 \%;$$

$$\varphi^{об} (N_2) = \frac{V(N_2) \cdot 100}{V_{III}^*} = \frac{25,71 \cdot 100}{46,9} = 54,8 \%;$$

$$\varphi^{об} (\Delta V_g) = \frac{V(\Delta V_g) \cdot 100}{V_{III}^*} = \frac{13 \cdot 100}{46,9} = 27,7 \%.$$

Следует обратить внимание, что более половины объема всех продуктов горения – это азот воздуха, израсходованного на горение. Если же горение протекает с коэффициентом избытка воздуха $\alpha > 1$, то избыточный воздух также составляет значительную часть продуктов горения.

Задание для самостоятельной работы.

Задача 6. Определить объем и состав в объемных процентах продуктов горения, образовавшихся при сгорании заданной массы вещества при данных температуре и давлении. Горение протекает с избытком воздуха α . Исходные данные по вариантам приведены в таблице 7.

Таблица 7

Задание к задаче 6.

№ вар	Вещество	Масса, кг	Температура, °С	Давление, мм рт ст	Коэффициент избытка воздуха, α
1	Ацетилен C_2H_2	1	10	750	1,0
2	Нитробензол $C_6H_5NO_2$	2	11	760	1,1
3	Толуол C_7H_8	3	12	755	1,2
4	Метан CH_4	4	13	765	1,3
5	Этанол C_2H_5OH	5	14	740	1,4
6	Бензол C_6H_6	6	15	745	1,5
7	Диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$	7	16	770	1,0
8	Бутан C_4H_{10}	8	17	775	1,1
9	Пентанол $C_5H_{11}OH$	9	18	780	1,2
10	Фенол C_6H_5OH	10	19	785	1,3
11	Ксилол C_8H_{10}	11	20	790	1,4

№ вар	Вещество	Масса, кг	Температура, °С	Давление, мм рт ст	Коэффициент избытка воздуха, α
12	Этилен C ₂ H ₄	12	21	760	1,5
13	Этиловый эфир уксусной кислоты C ₄ H ₈ O ₂	13	22	765	1,0
14	Бутилен C ₄ H ₈	14	23	770	1,1
15	Метанол C ₄ H ₈ ОН	15	24	745	1,2
16	Формальдегид CH ₂ O	16	25	750	1,3
17	Дихлорэтилен C ₂ H ₄ Cl ₂	17	26	755	1,4
18	Винилхлорид C ₂ H ₃ Cl	18	15	775	1,5
19	Хлорид аммония NH ₄ Cl	19	16	780	1,6
20	Бромэтан C ₂ H ₅ Br	20	17	785	1,0

Практическое занятие № 7.

Тема: «Расчет объема и процентного состава продуктов горения газовой смеси».

Цель: научиться рассчитывать объем и процентный состав продуктов горения газовой смеси.

Теоретическая часть:

При расчете продуктов горения газовой смеси необходимо знать, какой объем продуктов горения выделяется при сгорании 1 м³ каждого горючего газа смеси. Далее, зная процентное содержание (в объемных процентах) каждого горючего газа, вычислить суммарный объем образовавшихся продуктов горения. Если горение протекает с избытком воздуха, то в состав продуктов горения необходимо включить и избыточный воздух.

Пример. Определить объем и состав продуктов горения 10 м³ природного газа следующего состава (в % объемных): метан CH₄ – 75 %; этан C₂H₆ – 4 %; пропан C₃H₈ – 2 %; углекислый газ CO₂ – 19 %. Горение протекает при α=1,2.

Решение.

1. Составляем уравнение реакции горения для всех горючих газов смеси
 $\text{CH}_4 + 2(\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2) = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 2 \cdot 3,76\text{N}_2$, т.е. β(CH₄) = 2.

Для газообразных веществ отношение числа моль равно отношению объемов, следовательно, стехиометрические коэффициенты для каждого вещества

в реакции горения – это и есть объем в м³ каждого компонента продуктов горения, выделившийся при сгорании 1 м³ горючего газа.

По уравнению реакции можно определить, что при сгорании 1 м³ метана CH₄ образуется 1 м³ CO₂, 2 м³ H₂O и 2·3,76 м³ N₂.



При сгорании 1 м³ этана C₂H₆ образуется 2 м³ CO₂, 3 м³ H₂O

и 3,5·3,76 м³ N₂.



При сгорании 1 м³ этана C₃H₈ образуется 3 м³ CO₂, 4 м³ H₂O и 5·3,76 м³ N₂.

2. Определим теоретический объем продуктов горения.

Суммарный объем углекислого газа, образовавшегося при сгорании 1 м³ газовой смеси, определяется с учетом процентного состава каждого горючего компонента газовой смеси, и также включается объем углекислого газа, входящий в состав исходной газовой смеси:

$$V(CO_2) = 1 \cdot \frac{\varphi(CH_4)_{об}}{100} + 2 \cdot \frac{\varphi(C_2H_6)_{об}}{100} + 3 \cdot \frac{\varphi(C_3H_8)_{об}}{100} + \frac{\varphi(CO_2)_{об}}{100} = 1 \cdot \frac{\varphi(75)_{об}}{100} + 2 \cdot \frac{\varphi(4)_{об}}{100} + 3 \cdot \frac{\varphi(2)_{об}}{100} + \frac{\varphi(19)_{об}}{100} = 1,08 \text{ м}^3$$

При сгорании 10 м³ газовой смеси объем образовавшегося углекислого газа составит

$$V(CO_2) = 1,08 \cdot 10 = 10,8 \text{ м}^3$$

Аналогично рассчитываем объем паров воды, азота, образовавшийся в результате сгорания 1 м³ смеси газов.

Теоретический объем продуктов горения 10 м³ газовой смеси составит V_{ПГ} = (сложить все объемы).

3. Горение протекает с коэффициентом избытка воздуха α = 1,2, следовательно, в состав продуктов горения войдет и избыток воздуха. Для его расчета по формуле (2.1) определяем теоретический объем воздуха, необходимый для горения данной газовой смеси:

$$V_{теор}^в = \frac{2 \cdot 75 + 3,5 \cdot 4 + 5 \cdot 2}{21} \cdot 10 = 82,9 \text{ м}^3$$

Избыток воздуха определим по формуле (1.5)

$$\Delta V_в = V_{теор}^в \cdot (\alpha - 1) = 82,9 \cdot (1,2 - 1) = 16,6 \text{ м}^3$$

С учетом избытка воздуха практический объем продуктов горения составит

$$V_{ПГ}^* = V_{ПГ} + \Delta V_в = 93,3 + 16,6 = 109,9 \text{ м}^3$$

3. Определим процентный состав продуктов горения:

$$\varphi^{об}(CO_2) = \frac{V(CO_2) \cdot 100}{V_{ПГ}^*} = \frac{10,8 \cdot 100}{109,9} = 9,8\%$$

$$\varphi^{об}(\text{H}_2\text{O}) = \frac{V(\text{H}_2\text{O}) \cdot 100}{V_{\text{ПГ}*}} = \frac{17 \cdot 100}{109,9} = 15,5\%$$

$$\varphi^{об}(\text{N}_2) = \frac{V(\text{N}_2) \cdot 100}{V_{\text{ПГ}*}} = \frac{65,5 \cdot 100}{109,9} = 59,6\%$$

$$\varphi^{об}(\Delta V_6) = \frac{V(\Delta V_6) \cdot 100}{V_{\text{ПГ}*}} = \frac{16,6 \cdot 100}{109,9} = 15,1\%$$

Задание для самостоятельной работы.

Задача 7. Определить объем и состав продуктов горения $x \text{ м}^3$ газовой смеси известного состава. Горение протекает с избытком воздуха. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 7.

Таблица 8

Задание к задаче 7.

№ вар	Газовая смесь	Состав газовой смеси, %	Объем газовой смеси, м^3	Коэффициент избытка воздуха, α
1	Коксовый очищенный газ	оксид углерода (II) CO – 7 %, водород H_2 – 58 %, метан CH_4 – 23 %, углекислый газ CO_2 – 3 %, кислород O_2 – 1 %, азот N_2 – 8 %, этан C_2H_6 – 2 %, сероуглерод H_2S – 1 %	11	1,1
2	Биогаз	водород H_2 – 1 %, метан CH_4 – 70 %, углекислый газ CO_2 – 28 %, азот N_2 – 1 %, сероуглерод H_2S – 1 %	12	1,2
3	Сжиженный газ	метан CH_4 – 4 %, этан C_2H_6 – 6 %, пропан C_3H_8 – 79 %, бутан C_4H_{10} – 11 %	13	1,3
4	Бухарский газ	CO_2 – 1 %, азот N_2 – 1 %, этан C_2H_6 – 4 %	14	1,4
5	Воздушный газ	оксид углерода (II) CO – 34 %, водород H_2 – 10 %, метан CH_4 – 1 %, углекислый газ CO_2 – 1 %, азот N_2 – 56 %	15	1,5
6	Генераторный газ	оксид углерода (II) CO – 30 %, водород H_2 – 15 %, метан CH_4 – 5 %, углекислый газ CO_2 – 10 %, азот N_2 – 40 %	16	1,4
7	Шебелинский природный газ	метан CH_4 – 92 %, углекислый газ CO_2 – 2 %, азот N_2 – 3 %, этан C_2H_6 – 3 %, пропан C_3H_8 – 2 %, бутан C_4H_{10} – 1 %	17	1,3
8	Попутный нефтяной газ	метан CH_4 – 42 %, азот N_2 – 8 %, этан C_2H_6 – 20 %, пропан C_3H_8 – 20 %, бутан C_4H_{10} – 10 %	18	1,2
9	Дашавский природный газ	метан CH_4 – 98 %, азот N_2 – 2 %, этан C_2H_6 – 1 %, пропан C_3H_8 – 1 %	19	1,1

Продолжение таблицы

10	Ухтинский природный газ	метан CH_4 – 89 %, углекислый газ CO_2 – 5 %, азот N_2 – 5 %, этан C_2H_6 – 2 %, пропан C_3H_8 – 1 %, бутан C_4H_{10} – 1 %	20	1,2
11	Саратовский природный газ	метан CH_4 – 93 %, этан C_2H_6 – 8 %	21	1,3
12	Коксовый газ	оксид углерода (II) CO – 7 %, водород H_2 – 57 %, метан CH_4 – 23 %, углекислый газ CO_2 – 3 %, азот N_2 – 8 %, вода H_2O – 4 %	22	1,4
13	Светильный газ	оксид углерода (II) CO – 20 %, водород H_2 – 50 %, метан CH_4 – 23 %, углекислый газ CO_2 – 3 %, азот N_2 – 2 %, этан C_2H_6 – 2 %	23	1,5
14	Светильный газ	оксид углерода (II) CO – 10 %, водород H_2 – 50 %, метан CH_4 – 30 %, углекислый газ CO_2 – 3 %, кислород O_2 – 2 %, азот N_2 – 5 %	24	1,4
15	Природный газ	метан CH_4 – 90 %, углекислый газ CO_2 – 0,5 %, азот N_2 – 1 %, этан C_2H_6 – 6 %, пропан C_3H_8 – 4 %	25	1,3
16	Природный газ	водород H_2 – 4 %, метан CH_4 – 86 %, этан C_2H_6 – 2 %, пропан C_3H_8 – 4 %, бутан C_4H_{10} – 4 %	26	1,2
17	Водяной газ	оксид углерода (II) CO – 40 %, водород H_2 – 50 %, метан CH_4 – 1 %, углекислый газ CO_2 – 5 %, азот N_2 – 5 %	27	1,1
18	Водяной газ	оксид углерода (II) CO – 35 %, водород H_2 – 40 %, метан CH_4 – 14 %, углекислый газ CO_2 – 5 %, азот N_2 – 6 %	28	1,2
19	Водяной газ	оксид углерода (II) CO – 4 %, водород H_2 – 49 %, метан CH_4 – 5 %, углекислый газ CO_2 – 10 %, азот N_2 – 5,5 %	29	1,3
20	Доменный газ	оксид углерода (II) CO – 28 %, водород H_2 – 3 %, метан CH_4 – 1 %, углекислый газ CO_2 – 13 %, азот N_2 – 57 %	30	1,4

Практическое занятие № 8.

Тема: «Расчет объема и процентного состава продуктов горения вещества сложного элементного состава».

Цель: научиться рассчитывать объем и процентный состав продуктов горения вещества сложного элементного состава.

Теоретическая часть:

В том случае, когда горючее – сложное вещество с известным элементным составом, теоретический выход продуктов горения определяется как сумма продуктов горения каждого элемента, входящего в состав вещества.

Рассчитаем, какой теоретический объем продуктов горения образуется при сгорании 1 кг каждого элемента при нормальных условиях.

Для этого составим пропорции:

для углерода

$$\begin{array}{rcl} 1 \text{ кг} & x_1 \text{ м}^3 & x_2 \text{ м}^3 \\ C + (O_2 + 3,76N_2) & = CO_2 + 3,76N_2 \\ 12 \text{ кг} & 22,4 \text{ м}^3 & 3,76 \cdot 22,4 \text{ м}^3 \end{array}$$
$$V(CO_2) = x_1 = \frac{22,4}{12} = 1,87 \text{ м}^3$$
$$V(N_2) = x_2 = \frac{3,76 \cdot 22,4}{12} = 7 \text{ м}^3$$

для водорода

для серы

для фосфора

В состав горючего вещества может входить азот, влага, которые удаляются вместе с продуктами горения.

Объем 1 кг азота при нормальных условиях составит

$$V(N_2) = \frac{m(N_2) \cdot V_M}{M(N_2)} = \frac{1 \cdot 22,4}{28} = 0,8 \text{ м}^3$$

При нормальных условиях 1 кг паров воды займет объем

$$V(H_2O) = \frac{m(H_2O) \cdot V_M}{M(H_2O)} = \frac{1 \cdot 22,4}{18} = 1,24 \text{ м}^3$$

Если в состав горючего вещества входит кислород, то при горении он будет расходоваться на окисление горючих компонентов (углерода, водорода, серы, фосфора), и поэтому из воздуха на горение будет израсходовано кислорода меньше на количество, которое содержалось в горючем веществе. Следовательно, в продуктах горения азота будет меньше на количество, которое приходилось бы на кислород, если бы он находился не в горючем веществе, а в воздухе.

На 1 кг кислорода в воздухе будет приходиться объем азота, равный

$$V(N_2) = \frac{m(N_2) \cdot V_M}{M(N_2)} = \frac{3,76 \cdot 22,4}{32} = 2,63 \text{ м}^3$$

Полученные значения выходов продуктов горения элементов внесите в таблицу.

Теоретический объем продуктов горения элементов сложных веществ при нормальных условиях.

Элемент	Объем продуктов горения (м ³) на 1 кг вещества				
	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	P ₂ O ₅	N ₂
Углерод					
Водород					
Сера					
Фосфор					
Азот в горючем					
Азот за счет кислорода в горючем					
Влага в горючем					

Используя данные таблицы, можно вычислить объем продуктов горения любого вещества с известным элементным составом.

Пусть $\omega(C)$, $\omega(H)$, $\omega(S)$, $\omega(O)$, $\omega(N)$ – массовые доли элементов в веществе, %;

$\omega(W)$ – содержание влаги в веществе, %.

Тогда общие формулы для расчета каждого компонента продуктов горения при сгорании заданной массы (m) вещества будут иметь следующий вид:

$$V(\text{CO}_2) = m \cdot \frac{1,86 \cdot \omega(C)}{100} ; \text{ м}^3 \quad (2.4)$$

$$V(\text{H}_2\text{O}) = m \cdot \left(\frac{11,2 \cdot \omega(H)}{100} + \frac{1,24 \cdot \omega(W)}{100} \right); \text{ м}^3 \quad (2.5)$$

$$V(\text{SO}_2) = m \cdot \frac{0,7 \cdot \omega(S)}{100} ; \text{ м}^3 \quad (2.6)$$

$$V(\text{N}_2) = m \cdot \left(\frac{7 \cdot \omega(C)}{100} + \frac{21 \cdot \omega(H)}{100} + \frac{2,63 \cdot \omega(S)}{100} + \frac{0,8 \cdot \omega(N)}{100} - \frac{2,63 \cdot \omega(O)}{100} \right); \text{ м}^3 \quad (2.7)$$

Пример. Определить объем и процентный состав продуктов горения 5 кг каменного угля следующего состава (в %): С – 75,8 %; Н – 3,8 %; О – 2,8 %; S – 2,5 %; N – 1,1 %; W – 3,0 %; зола – 11,0 %. Горение протекает при $\alpha=1,3$, условия нормальные.

Решение.

1. По формулам (2.4) – (2.7) определяем объем каждого компонента продуктов горения 5 кг каменного угля.

$$V(\text{CO}_2) = 5 \cdot \frac{1,86 \cdot 75,8}{100} = 7 \text{ м}^3$$

$$V(\text{H}_2\text{O}) = 5 \cdot \left(\frac{11,2 \cdot (3,8)}{100} + \frac{1,24 \cdot (3)}{100} \right) = 2,31 \text{ м}^3$$

$$V(\text{SO}_2) = 5 \cdot \frac{0,7 \cdot 2,5}{100} = 0,085 \text{ м}^3$$

$$V(\text{N}_2) = 5 \cdot \left(\frac{7 \cdot 75,8}{100} + \frac{21 \cdot 3,8}{100} + \frac{2,63 \cdot 2,5}{100} + \frac{0,8 \cdot 1,1}{100} - \frac{2,63 \cdot 2,8}{100} \right) = 33,14 \text{ м}^3$$

2. Горение протекает с коэффициентом избытка воздуха 1,3, следовательно, в состав продуктов горения будет входить избыточный воздух.

По формуле (2.3) определяем теоретический объем воздуха, необходимый для горения данной массы образца угля:

$$V_{\text{в}}^{\text{теор}} = 5 \cdot 0,267 \cdot \left(\frac{75,8}{3} + 3,8 + \frac{2,5}{8} - \frac{2,8}{8} \right) = 38,6 \text{ м}^3$$

Избыток воздуха определим по формуле

$$\Delta V_{\text{в}} = V_{\text{в}}^{\text{теор}} \cdot (\alpha - 1) = 38,6 \cdot (1,3 - 1) = 11,6 \text{ м}^3$$

С учетом избытка воздуха практический объем продуктов горения составит

$$V_{\text{ПГ}}^* = V_{\text{ПГ}} + \Delta V_{\text{в}} = 42,5 + 11,6 = 54,1 \text{ м}^3$$

3. Определим процентный состав продуктов горения:

$$\varphi^{\text{об}}(\text{CO}_2) = \frac{V(\text{CO}_2) \cdot 100}{V_{\text{ПГ}}^*}$$

$$\varphi^{\text{об}}(\text{H}_2\text{O}) = \frac{V(\text{H}_2\text{O}) \cdot 100}{V_{\text{ПГ}}^*}$$

$$\varphi^{\text{об}}(\text{SO}_2) = \frac{V(\text{SO}_2) \cdot 100}{V_{\text{ПГ}}^*}$$

$$\varphi^{\text{об}}(\text{N}_2) = \frac{V(\text{N}_2) \cdot 100}{V_{\text{ПГ}}^*}$$

$$\varphi^{\text{об}}(\Delta V_{\text{в}}) = \frac{V(\Delta V_{\text{в}}) \cdot 100}{V_{\text{ПГ}}^*}$$

Задание для самостоятельной работы.

Задача 8. Определить объем и процентный состав продуктов горения заданной массы вещества известного состава, при избытке воздуха и нормальных условиях. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 9.

Задание к задаче 8.

№ вар	Название вещества	Масса кг	Коэф- фици- ент из- бытка воздуха α	Состав вещества, %						
				С	Н	О	N	S	Влага	Зола
1	Мазут высоко- сернистый	2	1,1	83,7	11,5	0,5	3,0	4,0	23,0	0,3
2	Мазут высоко- сернистый	3	1,2	85,8	8,7	0,4	0,4	0,7	3,8	0,2
3	Березов- ский уголь	4	1,3	44,3	3,0	14,4	0,4	0,2	33,0	4,7
4	Уголь	5	1,4	29,1	2,2	8,7	0,6	2,9	33,0	23,5
5	Бензин	6	1,5	85,0	14,9	0,02	0,03	0,15	1,2	0,3
6	Уголь	7	1,1	37,2	2,6	12,0	0,4	0,6	40,0	7,2
7	Сланец	8	1,2	38,8	3,2	4,0	0,1	1,5	15,0	37,4
8	Уголь	9	1,3	75,0	4,0	6,0	3,0	2,0	4,0	6,0
9	Мазут	10	1,4	83,4	10,0	0,1	0,3	2,9	3,0	0,3
10	Каменный уголь	11	1,5	76,0	4,5	3,5	1,8	4,7	3,0	6,5
11	Торф	2	1,1	43,0	7,0	41,0	2,0	3,3	7,0	11,5
12	Полуан- трацит	3	1,2	90,4	4,3	4,3	0,2	1,0	0,5	1,0
13	Древесина	4	1,3	41,5	6,0	43,0	2,0	1,5	7,5	8,3
14	Керосин	5	1,4	85,28	14,12	0,6	3,0	2,0	11,3	4,0
15	Каменный уголь	6	1,5	79,4	5,3	10,3	0,7	2,82	21,3	2,18
16	Нефть	7	1,1	84,0	14,0	13,0	1,0	1,0	18,3	4,5
17	Торф	8	1,2	36,0	4,0	12,0	8,0	0,7	35,0	5,0
18	Древесина	9	1,3	46,0	6,0	42,0	3,7	1,6	6,0	3,8
19	Мазут	10	1,4	85,0	14,0	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2
20	Каменный уголь	11	1,5	76,0	4,8	3,6	2,8	1,8	2,8	8,2

Практическое занятие № 9.

Тема: «Расчет теплового эффекта реакции горения индивидуального вещества».

Цель: научиться рассчитывать тепловой эффект реакции горения индивидуального вещества.

Теоретическая часть:

Для расчетов параметров процессов горения и взрыва используется низшая теплота сгорания Q_n , поскольку температура горения значительно выше 373К (100°C) и выделяющаяся при горении вода и влага вещества будут испаряться.

Низшую теплоту сгорания можно определить, если воспользоваться **следствием из закона Гесса:** теплота сгорания (тепловой эффект химической реакции горения) равна разности между суммой теплот образования продуктов горения и суммой теплот образования исходных веществ.

$$Q_n = n \sum \Delta H_{\text{обр.продуктов горения}} - n \sum \Delta H_{\text{обр.горючего вещества}}.$$

Пример. Рассчитать тепловой эффект реакции горения 1 моль бутана C_4H_{10} . (Использовать приложение 1).

Решение.

1. Запишем уравнение реакции горения бутана.



2. Выражение для теплового эффекта этой реакции по I следствию закона Гесса

$$Q_n = \sum \Delta H_{\text{обр.продуктов горения}} - n \sum \Delta H_{\text{обр.горючего вещества}}.$$

3. По таблице 1 приложения находим значения энтальпий образования углекислого газа, воды (газообразной) и бутана.

2. Подставляем эти значения в выражение для теплового эффекта реакции

Задание для самостоятельной работы.

Задача 9. Рассчитать тепловой эффект реакции горения 1 моль заданного вещества и выразить полученную величину в кДж/кг. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 10.

Таблица 10

Задание к задаче 9.

№ вар.	Вещество
1	Нитробензол – $C_6H_5NO_2$
2	Анилин – $C_6H_5NH_2$
3	Пентан – C_5H_{12}
4	Глицерин – $C_3H_8O_3$

5	Ацетон – CH_3COCH_3
6	Этаналь – CH_3COH
7	Метаналь – HCOH
8	Изопропиловый спирт – $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$
9	Пропиловый спирт – $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$
10	Этиловый спирт – $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$
11	Метиловый спирт – CH_3OH
12	Толуол – C_7H_8
13	Бензол – C_6H_6
14	Пропен – C_3H_6
15	Этилен – C_2H_4
16	Ацетилен – C_2H_2
17	Циклогексан – C_6H_{12}
18	Октан – C_8H_{18}
19	Гептан – C_7H_{16}
20	Гексан – C_6H_{14}

Практическое занятие № 10.

Тема: «Расчет низшей теплоты сгорания ΔH по формуле Д.И. Менделеева».

Цель: научиться рассчитывать низшую теплоту сгорания по формуле Д.И. Менделеева.

Теоретическая часть:

При расчете теплоты сгорания веществ сложного состава (древесина, нефть, торф) теплота сгорания определяется для каждого химического элемента, входящего в вещество с учетом их процентного содержания. На основе этого принципа Д.И.Менделеев получил формулу для расчета теплоты сгорания веществ сложного состава:

$$Q_{\text{н}} = 339,4 \cdot \omega(\text{C}) + 1257 \cdot \omega(\text{H}) - 108,9[(\omega(\text{O}) + \omega(\text{N}) - \omega(\text{S})) - 25,1 \cdot 9 \cdot \omega(\text{H}) + \omega(\text{W})], \text{ кДж/кг}$$

где - $\omega(\text{C})$, $\omega(\text{H})$, $\omega(\text{O})$, $\omega(\text{N})$, $\omega(\text{S})$ - массовые доли элементов в веществе, %;

$\omega(\text{W})$ - содержание влаги в веществе.

Теплота горения смеси газов и паров определяется как сумма произведений теплоты горения каждого горючего компонента (Q_H) на его объемную долю в смеси ($\varphi^{об}$)

$$Q_H = Q_H(1) \cdot \frac{\varphi^{об}}{100} + Q_H(2) \cdot \frac{\varphi^{об}}{100} + Q_H(3) \cdot \frac{\varphi^{об}}{100} \dots \text{кДж/м}^3$$

Пример. Вычислить низшую теплоту сгорания сульфадимезина $C_{12}H_{14}O_2N_4S$ по формуле Д.И. Менделеева.

Решение.

1. Для того, чтобы воспользоваться данной формулой, необходим расчет процентного состава каждого элемента в веществе (массовой доли).

Молярная масса сульфадимезина $C_{12}H_{14}O_2N_4S$ составляет 278 г/моль. Тогда

$$\omega(C) = \frac{12 \cdot 12}{278} = 51,8 \%,$$

аналогично рассчитываем $\omega(N)$, $\omega(O)$, $\omega(H)$, $\omega(S)$

Подставляем найденные значения в формулу Д.И. Менделеева

Задание для самостоятельной работы.

Задача 10. Вычислить низшую теплоту сгорания заданного вещества по формуле Д.И. Менделеева. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 11.

Таблица 11

Задание к задаче 10.

№ вар.	Вещество
1	Ацетат аммония – $NH_4C_2H_3O_2$
2	Метионин – $C_5H_{11}NO_2S$
3	Анилин – $C_6H_5NH_2$
4	Диметилфосфат – $(CH_3)_2HPO_4$
5	Пентанол – $C_5H_{11}OH$
6	Глицин – H_2NCH_2COOH
7	Хинин – $C_{20}H_{24}O_2N_2$
8	Этиленгликоль – CH_2OHCH_2OH
9	Хлоруксусная кислота – $CH_2ClCOOH$
10	Сульфаниловая кислота – $NH_2C_6H_4SO_3H$
11	Мочевина – NH_2CONH_2
12	Аспартам – $C_{14}H_{18}N_2O_5$
13	Глутамин – $C_5H_{10}N_2O_3$

14	Бензойная кислота – $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$
15	Пропен – CH_3CHCH_2
16	Винная кислота – $\text{H}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$
17	Никотиновая кислота – $\text{C}_5\text{H}_4\text{NCOOH}$
18	Пропанол-1 – $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$
19	Нитробензол – $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$
20	Бромэтан – $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{Br}$

Практическое занятие № 11.

Тема: «Расчет действительной температуры горения индивидуального вещества».

Цель: научиться рассчитывать действительную температуру горения индивидуального вещества.

Теоретическая часть:

Выделяющееся в зоне горения тепло расходуется на нагревание продуктов горения, на нагрев горючего вещества и окружающей среды. Та температура, до которой в процессе горения нагреваются продукты горения, называется температурой горения. В технике и пожарном деле различают теоретическую, калориметрическую, адиабатическую и действительную температуру горения.

Теоретическая температура горения – это температура, при которой выделившаяся теплота горения смеси стехиометрического состава расходуется на нагрев и диссоциацию продуктов горения. Практически диссоциация продуктов горения начинается при температурах выше 2000 К.

Калориметрическая температура горения – это температура, которая достигается при горении стехиометрической горючей смеси с начальной температурой 273 К и при отсутствии потерь в окружающую среду. Теоретическая и калориметрическая температура горения парогазовых смесей широко используется при оценке пожарной опасности веществ. Кроме того, ее можно применять для расчета максимального давления взрыва при горении парогазовой смеси в замкнутом объеме.

Адиабатическая температура горения – это температура полного сгорания смесей любого состава (коэффициент избытка воздуха $\alpha > 1$) при отсутствии потерь в окружающую среду.

Действительная температура горения – это температура горения, достигаемая в условиях реального пожара. Она намного ниже теоретической, ка-

лориметрической и адиабатической, т.к. в реальных условиях до 40 % теплоты горения обычно теряется на излучение, недожог и т.п.

Экспериментальное определение температуры горения для большинства горючих веществ представляет значительные трудности, особенно для жидкостей и твердых материалов. Однако в ряде случаев теория позволяет с достаточной для практики точностью вычислить температуру горения веществ, основываясь на знании их химической формулы, состава исходной смеси и продуктов горения. При расчетах исходят из того, что при быстром сгорании газо- и паровоздушных смесей развивается высокая температура. В этих условиях из-за большой скорости химических реакций к моменту окончания горения система приходит в состояние химического равновесия, и по этой причине при расчете можно применить законы термодинамики.

В общем случае для вычислений используется следующая зависимость

$$Q_{\text{пр}} = V_{\text{пр}} \cdot \overline{C_p} \cdot T_{\text{г}}$$

где $Q_{\text{пр}}$ – теплота (теплосодержание) продуктов горения, кДж/кг;

$V_{\text{пр}}$ – объем продуктов горения, м³/кг;

$\overline{C_p}$ – средняя объемная теплоемкость смеси продуктов горения в интервале температур от T_0 до $T_{\text{г}}$, кДж/м³·К;

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

В реальных условиях температура горения зависит не только от состава горючего материала, но и от условий горения: разбавления продуктов горения избыточным воздухом (что учитывается коэффициентом избытка воздуха α), начальной температуры воздуха, полноты сгорания исходного горючего материала и наличия теплопотерь (коэффициент теплопотерь η).

В зависимости от рода учитываемых потерь теплоты из зоны горения вычисляется та или иная температура горения.

Расчет температуры горения проводят по уравнению энергетического баланса

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{н}} \cdot (1 - \eta)$$

Алгоритм расчета температуры горения.

1. Рассчитать суммарный объем продуктов горения и отдельно объем каждого компонента продуктов горения.

$$V^{\text{пр}}_{\text{пр}} = V(\text{CO}_2) + V(\text{H}_2\text{O}) + V(\text{N}_2) + V(\text{SO}_2) + \Delta V_{\text{возд}}$$

Расчет объема продуктов горения выполняется в зависимости от характера горючего вещества (индивидуальное вещество, смесь газов или вещество сложного элементного состава).

Для индивидуальных веществ можно также определять количество продуктов горения в молях (коэффициенты в уравнении реакции горения).

2. Рассчитать низшую теплоту сгорания вещества. Для индивидуальных веществ расчет выполняется по I следствию закона Гесса (при наличии табличных значений энтальпий образования).

По формуле Д.И. Менделеева расчет Q_H может быть выполнен как для веществ с известным элементным составом, так и для индивидуальных веществ.

3. Если по условию задачи есть теплотери, то рассчитывается количество тепла, пошедшего на нагрев продуктов горения $Q_{пг}$

4. Находим среднее теплосодержание продуктов горения $Q_{ср}$:
при отсутствии теплотерь кДж/м^3 ;

$$Q_{ср} = \frac{Q_H}{V_{пг}}$$

при наличии теплотерь

$$Q_{ср} = \frac{Q_{пг}}{V_{пг}} \text{ кДж/м}^3$$

5. По значению $Q_{ср}$ с помощью таблиц приложений 3 и 4 («Теплосодержание газов при постоянном давлении»), ориентируясь на азот, приближенно определяем температуру горения T_1 .

При подборе температуры горения ориентируются на азот, т.к. в большей степени продукты горения состоят именно из азота. Однако, поскольку теплосодержание углекислого газа и паров воды выше, чем у азота, то их присутствие в продуктах горения несколько понижает температуру горения, поэтому ее нужно принимать несколько ниже (на 100-200 °C), чем по азоту.

6. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при выбранной температуре T_1 .

$$Q^1_{пг} = Q^1(\text{CO}_2) \cdot V(\text{CO}_2) + Q^1(\text{H}_2\text{O}) \cdot V(\text{H}_2\text{O}) + Q^1(\text{N}_2) \cdot V(\text{N}_2) + Q^1(\text{SO}_2) \cdot V(\text{SO}_2) + Q^1(\text{возд}) \cdot \Delta V(\text{в})$$

где - $Q^1(\text{CO}_2)$, $Q^1(\text{H}_2\text{O})$, $Q^1(\text{N}_2)$, $Q^1(\text{SO}_2)$, $Q^1(\text{возд})$ - табличные значения теплосодержания газов при выбранной температуре T_1 .

7. Сравниваем $Q^1_{пг}$ с Q_H или $Q_{пг}$, рассчитанных по п.2 или п.3.

Если $Q^1_{пг} < Q_H$ ($Q_{пг}$), то выбираем температуру $T_2 > T_1$ на 100 °C;

Если $Q^1_{пг} > Q_H$ ($Q_{пг}$), то выбираем температуру $T_2 < T_1$ на 100 °C;

8. Повторяем расчет теплосодержания продуктов горения при новой температуре T_2

$$Q^2_{пг} = Q^2(\text{CO}_2) \cdot V(\text{CO}_2) + Q^2(\text{H}_2\text{O}) \cdot V(\text{H}_2\text{O}) + Q^2(\text{N}_2) \cdot V(\text{N}_2) + Q^2(\text{SO}_2) \cdot V(\text{SO}_2) + Q^2(\text{возд}) \cdot \Delta V(\text{в})$$

9. Расчет проводим до получения неравенства

$$Q^1_{пг} < Q_H(Q_{пг}) < Q^2_{пг}$$

где $Q_{\text{пг}}^1$, $Q_{\text{пг}}^2$ – теплосодержание продуктов горения при температурах T_1 и T_2 , отличающихся на 100 °С.

10. Интерполяцией определяем температуру горения $T_{\text{Г}}$:

$$T_{\text{Г}} = T_1 + \frac{Q_{\text{пг}} - Q_{1\text{пг}}}{Q_{2\text{пг}} - Q_{1\text{пг}}} \cdot (T_2 - T_1), \text{ если } T_1 < T_2;$$

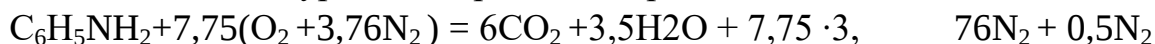
$$T_{\text{Г}} = T_2 + \frac{Q_{\text{пг}} - Q_{2\text{пг}}}{Q_{1\text{пг}} - Q_{2\text{пг}}} \cdot (T_2 - T_1), \text{ если } T_1 > T_2$$

Если потери тепла не учитывались, то получаем адиабатическую температуру горения, а если учитывались, то – действительную температуру горения вещества.

Пример. Вычислить действительную температуру горения анилина $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$, если потери тепла излучением составляют 20 %, а горение протекает с коэффициентом избытка воздуха 1,1.

Решение.

1. Составляем уравнение реакции горения анилина



По уравнению реакции горения определяем число моль (киломоляр) продуктов горения и число моль (киломоляр) избытка воздуха:

$$n_{\text{г}}^{\text{теор}} = 7,75 \cdot 4,76 = 36,89 \text{ моль},$$

$$\Delta n_{\text{г}} = n_{\text{г}}^{\text{теор}} \cdot (\alpha - 1) = 36,89 \cdot (1,1 - 1) = 3,689 \text{ моль},$$

$$n_{\text{пг}}^{\text{пр}} = n(\text{CO}_2) + n(\text{H}_2\text{O}) + n(\text{N}_2) + n(\Delta V_{\text{в}}) = 6 + 3,5 + 7,75 \cdot 3,76 + 0,5 + 3,689 = 42,829 \text{ моль}.$$

2. Теплота горения анилина по справочным данным [Баратов] составляет

$$Q_{\text{гор}} = 3484,0 \text{ кДж/моль} = 3484000 \text{ Дж/моль}.$$

3. По условию задачи теплотопери составляют 20 %, следовательно, $\eta = 0,2$.

$$Q_{\text{пг}} = 3484000 \cdot (1 - 0,2) = 2787200 \text{ Дж/моль (кДж/кмоль)}.$$

4. Определяем среднее теплосодержание продуктов горения

$$Q_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{пг}}}{n_{\text{пг}}^{\text{пр}}} = \frac{2787200}{42,829} = 65077,4 \text{ кДж}$$

По таблице приложения 3, ориентируясь на азот, определяем $T_1 = 1800$ °С.

5. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 1800 °С.

$$Q_{\text{пг}}^{1800} = 96579,5 \cdot 6 + 77598,8 \cdot 3,5 + 59539,9 \cdot 7,75 \cdot 3,76 + 66000 \cdot 3,689 = 2859312,7 \text{ кДж}.$$

6. $Q_{\text{пг}}^{1800} = 2859312,7 > Q_{\text{пг}} = 2787200$, следовательно, выбираем $T_2 = 1700$ °С.

7. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 1700 °С.

$$Q_{\text{пг}}^{1700} = 90545,9 \cdot 6 + 72445,1 \cdot 3,5 + 55936,5 \cdot 7,75 \cdot 3,76 + 56397,4 \cdot 3,689 = 2662844,5 \text{ кДж}.$$

$Q_{\text{ПГ}}^{1700} = 2662844,5 < Q_{\text{ПГ}} = 2787200$, следовательно температура горения находится в интервале от 1700 до 1800 °С.

8. Рассчитываем температуру горения по формуле (3.14)

$$T_{\text{Г}} = 1700 + \frac{2787200 - 2662844}{2859312 - 2662844} \cdot (1800 - 1700) = 1763^{\circ}\text{C} = 2036 \text{ К.}$$

Задание для самостоятельной работы.

Задача 11. Вычислить действительную температуру горения индивидуального вещества, если есть потери тепла излучением η , а горение протекает с коэффициентом избытка воздуха α . Теплота горения вещества по справочным данным составляет $Q_{\text{гор}}$, кДж/моль.

Таблица 12

Задание к задаче 11.

№ вар.	Вещество	Потери тепла излучением, η	Коэффициент избытка воздуха, α	Теплота горения $Q_{\text{гор}}$, кДж/моль
1	Бутан – C_4H_{10}	30	1,2	2657
2	Гептан – C_7H_{16}	40	1,3	4501
3	Глицерин – $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	20	1,4	1483
4	Изобутиловый спирт – $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	10	1,5	2723,4
5	Изопропиловый спирт – $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	30	1,1	2051,4
6	Метилацетат – $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$	40	1,2	1472,2
7	Метилциклогексан – C_7H_{14}	50	1,3	4293
8	Октан – C_8H_{18}	60	1,4	5116
9	Антрацен – $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$	10	1,1	7059
10	Пентен – C_5H_{10}	20	1,2	3154
11	Циклогексен – C_6H_{10}	30	1,3	3565
12	Циклокептан – C_7H_{14}	40	1,4	4328
13	Этиламин – $\text{C}_2\text{H}_7\text{N}$	50	1,5	1421,6
14	Этилацетат – $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	10	1,4	2078
15	Этан – C_2H_6	20	1,3	1576
16	Фенол – $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$	30	1,2	2992,3
17	Пропанол – $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	40	1,1	2067,4

18	Гексадекан – C ₁₆ H ₃₄	50	1,2	10034
19	Гептадекан – C ₁₇ H ₃₆	10	1,3	10649
20	Диэтиламин – C ₄ H ₁₁ N	20	1,4	2550,8

Практическое занятие № 12.

Тема: «Расчет действительной температуры горения сложного вещества с известным элементным составом».

Цель: научиться рассчитывать действительную температуру горения сложного вещества с известным элементным составом.

Алгоритм расчета смотреть в практическом занятии № 11.

Пример. Вычислить действительную температуру горения горючего сланца следующего состава: С – 35 %; Н – 5 %; О – 10 %; S – 4 %; N – 1 %; W – 15 %; зола – 30 %. Потери тепла излучением составляют 10 %, а горение протекает с коэффициентом избытка воздуха 1,2. Условия нормальные.

Решение.

1. По формулам (2.4) – (2.7) определяем объем каждого компонента продуктов горения 1 кг горючего сланца.

$$V(\text{CO}_2) = \frac{1,86 \cdot 35}{100} = 0,651 \text{ м}^3$$

$$V(\text{H}_2\text{O}) = \frac{11,2 \cdot 5}{100} + \frac{1,24 \cdot 15}{100} = 0,746 \text{ м}^3$$

$$V(\text{SO}_2) = \frac{0,7 \cdot 4}{100} = 0,028 \text{ м}^3$$

$$V(\text{N}_2) = \frac{7 \cdot 35}{100} + \frac{21 \cdot 5}{100} + \frac{2,63 \cdot 4}{100} + \frac{0,8 \cdot 1}{100} - \frac{2,63 \cdot 10}{100} = 3,455 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{ПГ}} = 0,651 + 0,746 + 0,028 + 3,455 = 4,88 \text{ м}^3.$$

2. Горение протекает с коэффициентом избытка воздуха 1,2, следовательно, в состав продуктов горения будет входить избыточный воздух.

По формуле (2.3) определяем теоретический объем воздуха, необходимый для горения данной массы образца угля:

$$V_{\text{в}}^{\text{теор}} = 0,267 \cdot \left(\frac{35}{3} + 5 + \frac{4}{8} - \frac{10}{8} \right) = 4,28 \text{ м}^3$$

Избыток воздуха определим по формуле

$$\Delta V_{\text{в}} = V_{\text{в}}^{\text{теор}} \cdot (\alpha - 1) = 4,28 \cdot (1,2 - 1) = 0,856 \text{ м}^3$$

С учетом избытка воздуха практический объем продуктов горения составит

$$V_{\text{ПГ}}^* = V_{\text{ПГ}} + \Delta V_{\text{в}} = 4,88 + 0,856 = 5,736 \text{ м}^3.$$

3. Рассчитываем Q_{H} по формуле (3.4) Д.И. Менделеева

$$Q_{\text{H}} = 339,4 \cdot 35 + 1257 \cdot 5 - 108,9 \cdot (10 + 1 - 4) - 25,1 \cdot (9 \cdot 5 + 15) = 15881,7 \text{ кДж/кг}.$$

4. С учетом теплотерь определяем теплосодержание продуктов горения

$$Q_{\text{ПГ}} = 15881,7 \cdot (1 - 0,1) = 14293,53 \text{ кДж/кг.}$$

5. Определяем среднее теплосодержание продуктов горения

$$Q_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{ПГ}}}{V_{\text{ПГ}^*}} = \frac{14293,53}{5,736} = 2480,22 \text{ кДж/м}^3$$

По таблице приложения 4, ориентируясь на азот, определяем $T_1 = 1500^\circ\text{C}$.

6. Определяем теплосодержание продуктов горения при 1500°C

$$Q_{\text{ПГ}}^{1500} = 3505,7 \cdot 0,651 + 2781,3 \cdot 0,746 + 2176,7 \cdot 3,455 + 3488,2 \cdot 0,028 + 2194,7 \cdot 0,856 = 13853,889 \text{ кДж.}$$

7. $Q_{\text{ПГ}}^{1500} = 13853,889 < Q_{\text{ПГ}} = 14293,53$, следовательно, выбираем $T_2 = 1600^\circ\text{C}$.

8. Определяем теплосодержание продуктов горения при 1600°C

$$Q_{\text{ПГ}}^{1600} = 3771,4 \cdot 0,651 + 3004,2 \cdot 0,746 + 2335,5 \cdot 3,455 + 3747,5 \cdot 0,028 + 2355,2 \cdot 0,856 = 14886,4 \text{ кДж.}$$

9. $Q_{\text{ПГ}}^{1600} = 14886,44 > Q_{\text{ПГ}} = 14293,53$, следовательно, температура горения вещества находится в интервале от 1500 до 1600°C .

10. Определяем температуру горения по формуле (3.13)

$$T_{\text{Г}} = 1500 + \frac{14293,53 - 13853,889}{14886,4 - 13853,889} \cdot (1600 - 1500) = 1556^\circ\text{C}$$

Задание для самостоятельной работы.

Задача 12. Вычислить действительную температуру горения сложного вещества с известным элементным составом, при потерях тепла излучением η и коэффициенте избытка воздуха α . Условия нормальные.

Таблица 13

Задание к задаче 12.

№ ва р	Название вещества	Потери тепла излуче- нием, η	Коэф- фициент избытка воздуха α	Состав вещества, %						
				С	Н	О	N	S	Влага	Зола
1	Уголь	20	1,1	75,0	4,0	6,0	3,0	2,0	4,0	6,0
2	Бензин	30	1,2	85,0	14,9	0,02	0,03	0,15	0,5	0,01
3	Нефть	40	1,3	84,0	14,0	0,5	1,0	1,0	0,8	0,7
4	Древесина	50	1,4	41,5	6,0	43,0	2,0	1,0	7,5	11,3
5	Каменный уголь	10	1,5	76,0	4,8	3,6	2,8	1,8	2,8	8,2

Продолжение таблицы

6	Мазут вы-сокосерни-стый	20	1,1	83,7	11,5	0,5	0,8	4,0	1,0	0,3
7	Полуан-трацит	30	1,2	90,4	4,3	4,3	1,0	1,0	0,8	0,2
8	Березов-ский уголь	40	1,3	44,3	3,0	14,4	0,4	0,4	33,0	4,7
9	Мазут	50	1,4	85,0	14,0	0,4	0,3	0,3	0,2	1,0
10	Сланец	10	1,5	38,8	3,2	4,0	0,1	1,5	15,0	37,4
11	Уголь	20	1,1	29,1	2,2	8,7	0,6	2,9	33,0	23,5
12	Древесина	30	1,2	46,0	6,0	42,0	10,0	1,0	6,0	12,0
13	Керосин	40	1,3	85,3	14,1	0,6	0,3	0,8	1,0	1,0
14	Каменный уголь	50	1,4	79,4	5,3	10,3	1,0	2,8	1,0	2,2
15	Торф	10	1,5	43,0	7,0	41,0	2,0	1,0	7,0	7,0
16	Мазут малосер-нистый	20	1,1	85,8	8,7	0,4	0,4	0,7	3,8	0,2
17	Уголь	30	1,2	37,2	2,6	12,0	0,4	0,6	40,0	7,2
18	Торф	40	1,3	36,0	4,0	12,0	8,0	1,0	35,0	5,0
19	Каменный уголь	50	1,4	76,0	4,5	3,5	1,8	4,7	3,0	6,5
20	Мазут	10	1,5	83,4	10,0	0,1	0,3	2,9	3,0	0,3

Практическое занятие №13.

Тема: «Расчет максимального давления взрыва газов и паров».

Цель: научиться рассчитывать максимальное давление взрыва газов и паров.

Теоретическая часть:

Взрыв (взрывное превращение) – это процесс быстрого физического или химического превращения вещества, сопровождающийся превращением потенциальной энергии в механическую энергию, движение или разрушение.

При сгорании паровоздушной смеси стехиометрического состава в замкнутом объеме создается максимальное давление взрыва. Величина такого давления в основном определяется степенью температурного расширения продуктов горения и является функцией отношения температуры взрыва к начальной температуре горючей смеси. Температура взрыва определяется энергетическими свойствами горючего материала. Чем выше теплота сгорания горючего

материала, тем выше температура взрыва и, соответственно, больше давление взрыва.

Расчет максимального давления взрыва производится по следующей формуле:

$$P_{взр} = \frac{P_0 \cdot T_{взр}}{T_0} \cdot \frac{m}{n}$$

где P_0 – начальное давление, кПа (Мпа)

T_0 – начальная температура, К

$T_{взр}$ – температура взрыва, К

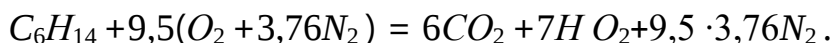
m – число молей (киломолей) газообразных продуктов горения

n – число молей (киломолей) исходных газообразных веществ.

Пример. Вычислить максимальное давление взрыва смеси гексана C_6H_{14} с воздухом, если начальное давление 101,3 кПа, начальная температура 273 К, температура взрыва 2355 К.

Решение.

1. Составляем уравнение реакции горения гексана в воздухе



2. Рассчитаем число молей (киломолей) газообразных веществ до и после взрыва:

$$m = 6 + 7 + 9,5 \cdot 3,76 = 48,72 \text{ моль};$$

$$n = 1 + 9,5 \cdot 4,76 = 46,22 \text{ моль}.$$

3. Максимальное давление взрыва составит

$$P_{взр} = \frac{101,3 \cdot 2355}{273} \cdot \frac{48,72}{46,22} = 921,1 \text{ кПа}.$$

Задание для самостоятельной работы.

Задача 13. Вычислить максимальное давление взрыва смеси вещества с воздухом, если начальное давление $P = 101,3$ кПа, начальная температура 273 К, температура взрыва T , К.

Задание к задаче 13.

Таблица 14

№ вар	Вещество	Температура взрыва, К
1	Циклопентан C_5H_{10}	1950
2	Этилацетат $C_4H_8O_2$	2230
3	Ацетон C_3H_6O	1835
4	Этиленгликоль $C_2H_4O_2$	2384
5	Пентан C_5H_{12}	1988

Продолжение таблицы

6	Бутанол C_4H_9OH	2036
7	Метанол CH_3OH	1739
8	Пропилбензол C_9H_{12}	2433
9	Гептан C_7H_{16}	1845
10	Бензол C_6H_6	1932
11	Ацетальдегид C_2H_4O	2084
12	Этилбензол C_8H_{10}	2112
13	Октан C_8H_{20}	2303
14	Пропанол C_3H_7OH	2353
15	Толуол C_7H_8	1831
16	Этанол C_2H_5OH	1989
17	Циклогексан C_6H_{12}	2103
18	Циклогексен C_6H_{10}	2209
19	Циклопентан C_5H_{10}	1798
20	Ксилол C_8H_{10}	2202

Практическое занятие № 14.

Тема: «Расчет избыточного давления взрыва индивидуальных веществ».

Цель: научиться рассчитывать избыточное давление взрыва индивидуальных веществ.

Теоретическая часть:

В практике при оценке устойчивости от взрыва используется величина **избыточного давления взрыва**.

Избыточное давление взрыва является основным критерием, разделяющим взрывоопасные категории помещений от пожароопасных. Этот показатель, главным образом, зависит от массы вещества, которое поступает в аварийное помещение, и доли ее, принимающей участие во взрыве.

Избыточное давление взрыва в замкнутом помещении – это разность между максимально возможным и начальным давлением, при котором он происходит

$$\Delta P = P_{\max} - P_0$$

Максимальное давление достигается:

- если вся масса горючего, поступившего в помещение, примет участие в образовании горючей среды и полностью взорвется;
- если помещение полностью герметично и в нем отсутствует теплоотвод через ограничивающие поверхности (неадиабатический процесс);
- если горючее и окислитель в горючей среде находятся в стехиометрическом соотношении.

В реальных условиях максимальное давление взрыва не достигается, так как имеются существенные отклонения. При расчете это необходимо учитывать, поэтому формулы для расчета ΔP индивидуальных веществ и смесей имеют более сложный вид.

Расчет избыточного давления взрыва для индивидуальных веществ производится согласно **ГОСТ Р 12.3.047 – 98 и НПБ 105-03**.

Избыточное давление взрыва ΔP для индивидуальных горючих веществ (газов и паров ЛВЖ и ГЖ), состоящих из атомов С, Н, О, N, Cl, Br, I, F, определяется по формуле

$$\Delta P = (P_{\max} - P_0) \cdot \frac{m \cdot Z}{V_{\text{св}} \cdot \rho \cdot \Gamma(\Pi)} \cdot \frac{100}{C_{\text{стех}}} \cdot \frac{1}{K_{\text{н}}} \quad \text{кПа},$$

где $P_{\max}$ - максимальное давление взрыва стехиометрической газовой и паровой смеси в замкнутом объеме. Определяется экспериментально или по справочным данным. При отсутствии данных допускается принимать $P_{\max} = 900$ кПа;

P_0 – начальное давление, кПа. Допускается принимать равным 101 кПа;

m – масса горючего газа или паров ЛВЖ и ГЖ, вышедших в результате аварии в помещение;

Z – коэффициент участия горючего во взрыве. Допускается принимать значение Z по таблице 15.

Значение коэффициента Z для различных видов горючего

Вид горючего	Значение
Водород	1,0
Горючие газы (кроме водорода), пыли	0,5
Легковоспламеняющиеся и горючие жидкости, нагретые до температуры вспышки и выше	0,3
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

Если принять, что давление в помещении равно нормальному атмосферному давлению (101,3 кПа), то плотность газа или пара можно рассчитать по следующей формуле:

$$\rho_{г(п)} = \frac{M}{V_0 \cdot (1 + 0,0037 \cdot t_{расч})} \quad \text{кг/м}^3$$

где M – молярная масса газа или пара, кг/кмоль;

V_0 – молярный объем при нормальных условиях, равный 22,4 м³/кмоль;

$t_{расч}$ – расчетная температура, °С.

С_{стех} – стехиометрическая концентрация горючих газов или паров ЛВЖ и ГЖ, % (объемных). Стехиометрическая концентрация вычисляется по формуле

$$C_{стех} = \frac{100}{1 + 4,76 \cdot \beta} \quad \%$$

где β – стехиометрический коэффициент кислорода в уравнении реакции горения. Коэффициент также может быть рассчитан по следующей формуле:

$$\beta = n_c + \frac{n_H - n_X}{4} - \frac{n_O}{2}$$

где n_C , n_H , n_X , n_O – число атомов С, Н, О, галогенов в молекуле горючего вещества.

K_H – коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения. Допускается принимать $K_H = 3$.

Пример. Вычислить избыточное давление взрыва в помещении, где обращается толуол.

Данные для расчета.

1. Характеристика горючего вещества:

толуол $C_6H_5CH_3$ – метилбензол; температура вспышки $t_{всп} = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$; нижний концентрационный предел распространения пламени НКПР = 1,21 %; константы уравнения Антуана: $A = 6,0507$; $B = 1328,17$; $C = 217,713$; плотность жидкости $\rho_{ж} = 867\text{ кг/м}^3$; максимальное давление взрыва паров толуола $P_{макс} = 634\text{ кПа}$.

2. Характеристика помещения:

длина $l = 18\text{ м}$;

ширина $b = 12\text{ м}$;

высота $h = 6\text{ м}$;

температура воздуха в помещении $25\text{ }^{\circ}\text{C}$;

скорость воздушного потока в помещении $0,1\text{ м/с}$.

3. Характеристика оборудования и параметры технологического процесса:

объем аппарата $V_{ап} = 0,05\text{ м}^3$;

степень заполнения аппарата жидкостью $\varepsilon = 0,85$;

температура жидкости в аппарате $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В результате аварийной ситуации аппарат полностью разрушен, вся жидкость поступила в помещение. Испарение жидкости проходило в течение 1 часа.

Решение.

1. Определяем массу жидкости, которая поступит в помещение $m_{АП}$.

$$m_{АП} = 867 \cdot 0,05 \cdot 0,85 = 37\text{ кг}.$$

2. Определяем площадь испарения жидкости

$$S_{ИСПАР} = 37\text{ м}^2.$$

3. Определяем интенсивность испарения $W_{ИСП}$. Для этого находим известные величины.

При $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\omega_{ВОЗД} = 0,1\text{ м/с}$ коэффициент $\eta = 2,1$, молярная масса толуола ($C_6H_5CH_3$) $M = 92\text{ кг/кмоль}$.

Давление насыщенного пара толуола определяем по уравнению Антуана. В качестве температуры жидкости $t_{ж}$ принимаем среднюю температуру между температурой воздуха в помещении и температурой жидкости в аппарате

$$t_{ж} = (25 + 40) / 2 = 32,5\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

$$P_s = 10^{(6,0507 - \frac{1328,17}{217,713 + 32,5})} = 5,53\text{ кПа}.$$

Тогда интенсивность испарения будет равна

$$W_{ИСП} = 10^{-6} \cdot 2,1 \cdot \sqrt{92 \cdot 5,53} = 111,4 \cdot 10^{-6}\text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$$

4. Определяем массу жидкости, испарившейся с поверхности разлива $m_{ИСП ЖИДК}$.

Расчетное время испарения принимаем

$$t_{\text{расч}} = 3600 \text{ с.}$$

$$\text{Тогда } m_{\text{исп жидк.}} = 111,4 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 \cdot 37 = 14, \text{ кг.}$$

5. Определяем избыточное давление при взрыве паров толуола

Для расчета нам известны следующие величины:

$$P_{\text{MAX}} = 634 \text{ кПа;}$$

$$P_0 = 101 \text{ кПа;}$$

$$m = 14,8 \text{ кг;}$$

$Z = 0,3$ (по таблице 2 приложения; по условию нашей задачи толуол – ЛВЖ, нагретая выше температуры вспышки); $K_H = 3$.

Остальные величины V_{CB} , ρ_G , $C_{\text{СТЕХ}}$ необходимо рассчитать.

6. Определим свободный объем помещения $V_{\text{CB}} = 18 \cdot 12 \cdot 6 \cdot 0,8 = 1036,8 \text{ м}^3$

7. Определим плотность паров толуола в помещении ρ_G .

Температура воздуха в помещении $t_{\text{расч}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

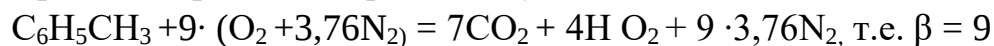
Поскольку атмосферное давление в помещении принимаем равным нормальному атмосферному давлению P_0 , плотность паров можно рассчитать по формуле

$$\rho_G = \frac{92}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 25)} = 3,76 \text{ кг/м}^3$$

8. Определим стехиометрическую концентрацию паров толуола $C_{\text{СТЕХ}}$

$$C_{\text{СТЕХ}} = \frac{100}{1 + 4,76 \cdot \beta} \%$$

Уравнение реакции горения толуола



Коэффициент β можно рассчитать и по формуле

$$\beta = 7 + 8 / 4 = 9.$$

$$\text{Тогда } C_{\text{СТЕХ}} = 100 / (1 + 4,76 \cdot 9) = 1,86 \%$$

9. Определяем избыточное давление взрыва паров толуола, используя величины, полученные в п.п. 6 – 8:

$$\Delta P = (634 - 101) \cdot \frac{14,8 \cdot 0,3}{1036,8 \cdot 3,76} \cdot \frac{100}{1,86} \cdot \frac{1}{3} = 10,9 \text{ кПа}$$

Задание для самостоятельной работы.

Задача 14. Вычислить избыточное давление взрыва в помещении, где обрабатывается заданное вещество.

Данные для расчета

1. Характеристика горючего вещества: температура вспышки $t_{\text{всп}}$, $^\circ\text{C}$; нижний концентрационный предел распространения пламени НКПР; константы

уравнения Антуана; плотность жидкости $\rho_{ж}$; максимальное давление взрыва паров вещества $P_{мах}$.

2. Характеристика помещения: длина l , ширина b , высота h ; температура воздуха в помещении $T_{в}$, °С, скорость воздушного потока в помещении U , м/с.

3. Характеристика оборудования и параметры технологического процесса: объем аппарата $V_{ап}$, м³; степень заполнения аппарата жидкостью ε , температура жидкости в аппарате $T_{ж}$, °С.

В результате аварийной ситуации аппарат полностью разрушен, вся жидкость поступила в помещение. Испарение жидкости проходило в течение τ , ч.

Задание к задаче № 14.

Таблица 16 (Приложение № 5).

Практическое занятие № 15.

Тема: «Расчет тротилового эквивалента взрыва».

Цель: научиться рассчитывать тротиловый эквивалент взрыва.

Теоретическая часть:

Для сравнительной оценки уровня воздействия взрыва газо- паровоздушной смеси используется тротиловый эквивалент взрыва.

Тротиловым эквивалентом взрыва называется условная масса тринитротолуола (тротила), взрыв которой адекватен по степени разрушения взрыву парогазовой среды с учетом реальной доли участия во взрыве горючего вещества.

Тротиловый эквивалент взрыва определяется по формуле

$$W_T = \frac{0,4}{0,9} \cdot \frac{Q_H}{Q_T} \cdot z \cdot m \quad \text{кг},$$

где 0,4 - доля энергии взрыва парогазовой смеси, затрачиваемой непосредственно на формирование ударной волны;

0,9 – доля энергии взрыва тринитротолуола, затрачиваемой непосредственно на формирование ударной волны;

Q_H – удельная (низшая) теплота сгорания парогазовой среды, кДж/кг;

Q_T – удельная теплота взрыва ТНТ ($q_T = 4240$ кДж/кг);

z – доля приведенной массы паров, участвующей во взрыве.

В общем случае для неорганизованных парогазовых облаков в незамкнутом пространстве с большой массой горючих веществ доля участия во взрыве может приниматься 0,1. В отдельных обоснованных случаях доля участия веществ во взрыве может быть снижена, но не менее чем до 0,02.

Для производственных помещений (зданий) и других замкнутых объемов значения z могут приниматься в соответствии с табл. 15.

Пример. В производственном помещении находится аппарат с бензолом C_6H_6 . Масса жидкости в аппарате 20 кг. В результате аварии аппарат разрушен, жидкость поступила в помещение и полностью испарилась. Вычислить тротильный эквивалент взрыва паровоздушной смеси. Теплота сгорания бензола составляет 3169,4 кДж/моль.

Решение.

1. Определим низшую теплоту сгорания бензола $M(C_6H_6) = 78$ кг/кмоль.

$$Q_H = \frac{3169,4 \cdot 1000}{78} = 40633 \text{ кДж/кг.}$$

2. Для легковоспламеняющейся жидкости бензола в замкнутом помещении

$$z = 0,3.$$

3. Рассчитаем тротильный эквивалент взрыва

$$W_T = \frac{0,4}{0,9} \cdot \frac{40633}{4240} \cdot 0,3 \cdot 20 = 25,6 \text{ кг.}$$

Задание для самостоятельной работы.

Задача 15. В производственном помещении находится аппарат с горючей жидкостью. Масса жидкости в аппарате m , кг. В результате аварии аппарат разрушен, жидкость поступила в помещение и полностью испарилась. Вычислить тротильный эквивалент взрыва паровоздушной смеси. Теплота сгорания вещества составляет Q_H , кДж/моль. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 17.

Задание к задаче № 15.

Таблица 17.

№ вар.	Вещество	Масса, кг	Теплота сгорания, кДж/моль
1	Амилацетат $C_7H_{14}O_2$	10	3889,9
2	Амиловый спирт $C_5H_{12}O$	11	3383,6
3	Ацетальдегид C_2H_4O	12	1192,48
4	Ацетон C_3H_6O	13	1821,38
5	Бутилацетат $C_6H_{12}O_2$	14	3285
6	Бутиловый спирт $C_4H_{10}O$	15	2728
7	Гексан C_4H_{14}	16	3887
8	Гексиловый спирт $C_6H_{14}O$	17	4044,6
9	Гептан C_7H_{16}	18	4501

Продолжение таблицы

10	Декан $C_{10}H_{22}$	19	6346
11	Диэтиламин $C_4H_{11}N$	20	2550,8
12	Изопентан C_5H_{12}	21	3264
13	Метилпропилкетон C_4H_8O	22	2918
14	Нонан C_9H_{20}	23	5731
15	Октан C_8H_{18}	24	5116
16	Пентан C_5H_{12}	25	3272
17	Пиридин C_5H_5N	26	2822
18	Стирол C_8H_8	27	4438,8
19	Толуол C_7H_8	28	3771,88
20	Этилацетат $C_4H_8O_2$	29	2078

Практическое занятие № 16.

Тема: «Расчет радиуса зон разрушения».

Цель: научиться рассчитывать радиус зон разрушения.

Теоретическая часть:

Значения избыточного давления взрыва и тротилового эквивалента взрыва используются для расчета радиуса зон разрушений.

Зоной разрушения считается площадь с границами, определяемыми радиусами R , центром которой является рассматриваемый технологический блок или наиболее вероятное место разгерметизации технологической системы. Классификация зон разрушения приводится в табл. 18.

Таблица 18.

Классификация зон разрушения.

Класс зоны разрушения	K	ΔP , кПа
1	3,8	≥ 100
2	5,6	70
3	9,6	28
4	28,0	14
5	56,0	$\leq 2,0$

Границы каждой зоны характеризуются значениями избыточных давлений по фронту ударной волны ΔP и соответственно безразмерным коэффициентом K .

Радиус зоны разрушения (м) в общем виде определяется выражением

$$R = K \cdot \frac{\sqrt[3]{W_T}}{\left(1 + \left(\frac{3180}{W_T}\right)^2\right)^{1/6}},$$

где K - безразмерный коэффициент, характеризующий воздействие взрыва на объект.

При массе паров t более 5000 кг радиус зоны разрушения может определяться выражением

$$R = K \cdot \sqrt[3]{W_T}$$

Пример. Определить радиус зон разрушений в помещении, где произошло разрушение аппарата с толуолом. Условие из практического занятия № 14.

Решение.

1.

Определим низшую теплоту сгорания толуола $M(C_6H_5CH_3) = 92$ кДж/кмоль, $\Delta H_{сгор} = -3771,9$ кДж/моль,

$$Q_H = \frac{3771,9 \cdot 1000}{92} = 40999 \text{ кДж/кг.}$$

2. Для легковоспламеняющейся жидкости бензола в замкнутом помещении $z = 0,3$.

3. Рассчитаем тротиловый эквивалент взрыва

$$W_T = \frac{0,4}{0,9} \cdot \frac{40999}{4240} \cdot 0,3 \cdot 37 = 47,7 \text{ кг.}$$

4. В соответствии с расчетом в примере $\Delta P = 10,9$ кПа.

Тогда по таблице 6.2 класс зоны разрушений 4 и коэффициент $K = 28$.

5. Радиус зоны разрушений составит

$$R = 28 \cdot \frac{\sqrt[3]{47,7}}{\left(1 + \left(\frac{3180}{47,7}\right)^2\right)^{1/6}} = 24,9 \text{ м}$$

Задание для самостоятельной работы.

Задача 16. Определить радиус зон разрушений в помещении, где произошло разрушение аппарата с заданным веществом (см. условие из задачи практического занятия № 14. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 19.

Задание к задаче № 16.

Таблица 19

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta H_{сгор}$, кДж/моль	-3889,9	-3823	-3383,6	-1192,4	-1821,3	-3169,4	-3285	-2728	-3887	-4501

№ вар	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\Delta H_{\text{сгор}}$, кДж/моль	1284	2323	1076	2531	2723,4	2051,4	736,8	3272	2822	4438,8

ТИПОВЫЕ ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Сложный, быстро протекающий химический процесс окисления, сопровождающийся выделением значительным количеством тепла и свечением, называется ...

Ответ: горением

2. Быстропротекающий процесс физических и химических превращений веществ, сопровождающийся освобождением большого количества энергии в ограниченном объеме, в результате которого в окружающем пространстве образуется и распространяется ударная волна, способная создать угрозу жизни и здоровью людей, нанести ущерб хозяйственным и иным объектам и стать источником ЧС – это ...

Ответ: взрыв

3. Количество горючей смеси, сгорающей на единице поверхности фронта пламени в единицу времени, это ...

Ответ: массовая скорость горения

4. Смесь, в которой горючее вещество предварительно равномерно смешано с окислителем, называется ...

Ответ: гомогенная однородная смесь

5. Горючие вещества и материалы, способные воспламеняться от кратковременного воздействия источника зажигания с низкой энергией, называются...

Ответ: легковоспламеняющиеся

6. Вещества, состав которых можно выразить химической формулой – это ...

Ответ: индивидуальные химические соединения

7. Данному виду горения подвержены только пористые вещества и материалы, образующие твердый углистый остаток при нагревании, а также в ряде случаев горючие жидкости, пропитавшие твердые пористые материалы

Ответ: тление

8. Для решения многих практических задач, а также для выполнения пожарно-технических расчетов необходимо знать _____, необходимого для горения, а также объем и состав продуктов горения.

Ответ: количество воздуха

9. При стехиометрической концентрации горючего вещества

1. скорость химической реакции горения минимальна

2. происходит самовоспламенение горючей смеси

3. температура горючей смеси постоянна

4. скорость химической реакции горения максимальна

10. Установите соответствие между составом горючего вещества и продуктами горения

Элементы, входящие в состав горючего вещества		Продукты горения	
1	Углерод C	а	Углекислый газ CO ₂
2	Водород H ₂	б	Вода H ₂ O
3	Сера S	в	Оксид серы SO ₂
4	Азот N	г	Молекулярный азот N ₂

Ответ: 1а; 2б; 3в; 4г

11. Скорость пламени резко снижается при уменьшении содержания кислорода, и при его содержании менее _____ пламя не распространяется и взрыва не происходит.

Ответ: 16%

12. Количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании 1 кг или 1 м³ вещества

Ответ: теплотворная способность вещества

13. Концентрационные пределы воспламенения с повышением температуры смеси...

Ответ: расширяются

14. Необходимо предохранять взрывчатые вещества от воздействия высокой температуры, солнечного и теплового излучения, открытого огня. Температура при хранении должна быть...

Ответ: от + 5 до +15 °С.

15. Для оценок опасности возникновения и степени поражения человека и зданий от пожаров и взрывов, как правило, используется низшая удельная теплота горения, выраженная в _____

Ответ: МДж/кг

16. Температуры вещества, при которых его насыщенные пары образуют концентрации, равные соответственно нижнему (нижний температурный предел) и верхнему (верхний температурный предел) концентрационным пределам распространения пламени

Ответ: температурные пределы распространения пламени

17. Легковоспламеняющаяся жидкость (ЛВЖ) – взрывоопасное вещество в жидком состоянии, способное самостоятельно гореть после удаления источника зажигания и имеющая температуру вспышки не выше _____

Ответ: 61°C

18. Величина избыточного давления на фронте падающей ударной волны равной _____ в регламентирующих документах принимается безопасной для человека

Ответ: 5 кПа

19. Установление соответствие горения по скорости распространения пламени

Наименование горения		Скорость распространения пламени	
1	Медленное горение	а	До 10 м/с
2	Дефлаграционное турбулентное горение	б	От 10 до 300 м/с
3	Взрывное горение	в	Близкая к скорости звука
4	Детонация	г	Сверхзвуковая

Ответ: 1а; 2б; 3в; 4г

20. Главная причина образования продуктов неполного сгорания при сжигании газа:

1. чрезмерный избыток воздуха

2. недостаточное количество воздуха

3. низкая температура горения

4. низкое давление

21. Ответственный за пожарную безопасность на предприятии производит расчет категорий помещений с целью:

- для выполнения обязательных требований пожарной безопасности

- привести в соответствие с требованиями систему противопожарной защиты объекта

- проверить правильность расчета категории помещения после реконструкции

- для прохождения проверки Ростехнадзора

22. Для определения пожарной нагрузки при оценке категории помещений, а также теплоты сгорания веществ, применяется данная методика

Ответ: ГОСТ Р 56025-2014 «Материалы строительные. Метод определения теплоты сгорания»

23. Поглощение вещества из газовой смеси или жидкой среды поверхностным слоем твердого тела или жидкости называется...

Ответ: адсорбция

24. Разрушение сооружений и (или) технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, неконтролируемый пожар и (или) взрыв, и (или) выброс опасных веществ ...

Ответ: авария

25. Требования к установке газоанализаторов для обеспечения взрывопожаробезопасности на опасных производственных объектах нефтегазоперерабатывающих производств устанавливаются в соответствии с нормативным документом

Ответ: «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств», Приказ Ростехнадзора от 15 декабря 2020 года N 533

26. Базовый руководящим документом в сфере пожарной безопасности, которым предусмотрены все виды классификации для зданий, помещений, конструкций, пожарных отсеков, оборудования.

Ответ: Закон № 123-ФЗ (технический регламент)

27. В настоящем стандарте использованы принципиальные положения по определению теплоты сгорания строительных материалов, а также описание устройства, принцип действия и другие сведения, необходимые для правильной эксплуатации калориметра сгорания - установки экспериментального определения теплоты сгорания строительных материалов

Ответ: ГОСТ Р 56025-2014 Материалы строительные. Метод определения теплоты сгорания

28. Перечень показателей, необходимых для оценки пожарной опасности веществ и материалов в зависимости от их агрегатного состояния установлен в ...

Ответ: ФЗ-123 в приложении «Таблицы показателей пожарной безопасности»

29. Критерием для классификации горючих жидкостей является ...

1. скорость детонации

2. температура вспышки

3. температура воспламенения

4. температура самовоспламенения

30. Вещества, вводимые в состав взрывчатых веществ для повышения его чувствительности

1. окислители

2. сенсibilизаторы

3. стабилизаторы

4. флегматизаторы

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Какие загрязняющие вещества образуются при горении?
2. Условия полного сгорания углеводородного топлива?
3. Продукты неполного сгорания топлива и механизмы их образования.
4. Источники и механизмы образования окислов азота при сжигании органических топлив.
5. Скорость химической реакции. Зависимость скорости химической реакции от времени, концентрации, температуры, давления.
6. Диссоциация продуктов горения. Влияние диссоциации на температуру горения.
7. Что такое горение? Охарактеризуйте тепловой эффект реакции горения.
8. Приведите химические уравнения реакций горения водорода и оксида углерода.
9. Приведите реакции горения любого углеводородного газа.
10. В чем сущность цепного механизма реакций горения?
11. Приведите пример цепной реакции горения водорода.
12. Как производится расчет продуктов горения?
13. Что такое жаропроизводительность? Приведите формулу её определения.
14. В чём отличие калориметрической и теоретической температур горения?
15. Как рассчитать действительную температуру горения?
16. Что понимают под температурой воспламенения?
17. Что понимают под нижним и верхним концентрационным пределом воспламенения?
18. Как можно рассчитать давление, возникающее при взрыве газов?
19. Что понимают под нормальной скоростью распространения пламени?
20. Приведите значения максимальной нормальной скорости распространения пламени для различных горючих газов.
21. В каком случае горения имеет место равномерная скорость распространения пламени?
22. Дайте характеристику распространения пламени в ламинарном потоке.
23. Охарактеризуйте распространение пламени в турбулентном потоке.
24. Что такое отрыв пламени и каковы его последствия?
25. Что такое проскок пламени и каковы его последствия?
26. Какие вы знаете методы стабилизации пламени?

27. При каких значениях скоростей может произойти проскок пламени при сжигании природного и сжиженного газа?

28. Как можно рассчитать максимальные значения скоростей смеси газа с воздухом, при которых возможен проскок пламени?

29. Какие принципы сжигания газов вы знаете?

30. Дайте характеристику диффузионного принципа сжигания газов.

31. Дайте характеристику кинетического способа сжигания газов.

32. Охарактеризуйте диффузионно-кинетический метод сжигания газов.

33. Охарактеризуйте структуру свободного диффузионного пламени в случаях ламинарного и турбулентного горения.

34. В чем принципиальное отличие строения ламинарного и турбулентного пламени?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важную роль в деле подготовки специалистов по техносферной безопасности играет дисциплина «Теория горения и взрыва». В ее задачу входит: дать современные научные представления об основных понятиях и определениях, характеризующих пожарную опасность веществ и материалов, закономерностях процессов возникновения и развития устойчивого горения, методики оценки пожаровзрывоопасности среды.

Глубокое изучение такого сложного и многофакторного явления, как процесс горения, практически невозможно без выполнения решения задач по расчету параметров пожарной опасности веществ и материалов.

В результате освоения дисциплины студент овладевает методами расчета параметров пожарной опасности веществ и более углубленного понимания закономерностей процессов воспламенения, распространения горения и его прекращения.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Основная литература:

1. Теория горения и взрыва: учебник и практикум для прикладного бакалавриата / А. В. Тотай [и др.]; под общей ред. А. В. Тотая, О. Г. Казакова. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2019. – 254 с.
2. Девисилов, В.А. Теория горения и взрыва: учебник / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, А.И. Скушникова. – Москва: ИНФРА-М, 2017. – 262 с.

Дополнительная литература:

1. Шапров, М.Н. Теория горения и взрыв: учебное пособие / М.Н. Шапров. – Волгоград: Волгоградский ГАУ, 2016. – 92 с.
2. Теория горения и взрыва. Краткий конспект лекций [Электронный ресурс]: электронное учебное пособие для студентов направления подготовки бакалавров «Техносферная безопасность» / сост.: Н. П. Лесникова; ФГБОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева», Каф.углехимии, пластмасс и инженер. защиты окруж. среды. – Кемерово: Издательство КузГТУ, 2015. – 118 с.
3. Баратов А.Н. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справ, изд.: в 2 кн. / А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.И. Кравчук – Москва: Химия, 1990. – 496 с.
4. Баратов А.Н. Пожарная опасность. Взрывобезопасность. Справ, изд.: / А.Н. Баратов, Е.Н. Иванов, А.Я. Корольченко, Г.И. Кравчук – Москва: Химия, 1987. – 272 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

*Стандартные энтальпии образования и энтропии некоторых веществ
при 298 °K*

№ п/п	Вещество	ΔH^0 обр., кДж/моль	S^0 , Дж/моль·К
1	Углекислый газ CO ₂ (г)	- 393,5	213,7
2	Вода H ₂ O (г)	- 241,8	188,7
3	Азот N ₂ (г)	0	191,5
4	O ₂ (г)	0	205,0
5	Бутан C ₄ H ₁₀ (г)	- 126,2	310,1
6	Пентан C ₅ H ₁₂ (г)	- 146,4	348,9
7	Гексан C ₆ H ₁₄ (ж)	- 198,8	295,9
8	Гептан C ₇ H ₁₆ (ж)	- 224,4	328,5
9	Октан C ₈ H ₁₈ (ж)	- 208,5	466,7
10	Циклопентан C ₅ H ₁₀ (г)	- 77,2	292,9
11	Циклогексан C ₆ H ₁₂ (г)	- 123,1	298,2
12	Ацетилен C ₂ H ₂ (г)	226,8	200,8
13	Этилен C ₂ H ₄ (г)	52,3	219,4
14	Пропен C ₃ H ₆ (г)	20,4	266,9
15	Бутен-1 C ₄ H ₈ (г)	- 0,13	305,6
16	Бутадиен-1,3 C ₄ H ₆ (г)	110,2	278,7
17	Бензол C ₆ H ₆ (ж)	49,1	173,2
18	Толуол C ₇ H ₈ (ж)	12,0	219,6
19	о- Ксилол C ₈ H ₁₀ (ж)	19,0	352,8
20	м-Ксилол C ₈ H ₁₀ (ж)	17,2	357,7
21	Метиловый спирт CH ₃ OH (ж)	- 238,7	126,7
22	Этиловый спирт C ₂ H ₅ OH (ж)	- 277,6	160,7

Продолжение таблицы

23	Пропиловый спирт C_3H_7OH (ж)	- 306,9	192,9
24	Изопропиловый спирт C_3H_8O (ж)	- 320,3	179,9
25	Метаналь $HCOH$ (г)	- 115,9	220,1
26	Этаналь CH_3COH (г)	- 166,4	265,7
27	Муравьиная кислота $HCOOH$ (ж)	- 409,2	128,9
28	Уксусная кислота CH_3COOH (ж)	- 487,0	159,8
29	Ацетон CH_3COCH_3 (ж)	- 248,3	155,4
30	Этилацетат $CH_3COOC_2H_5$ (ж)	- 463,2	259,0
31	Глицерин $C_3H_8O_3$ (ж)	- 659,4	207,9
32	Диметиламин $(CH_3)_2NH$	- 27,6	273,2
33	Анилин $C_6H_5NH_2$	35,3	191,6
34	Нитробензол $C_6H_5NO_2$	15,9	244,3

Приложение 2

Низшая теплота сгорания некоторых сложных веществ

Вещество	Q_H , кДж/кг	Вещество	Q_H , кДж/кг
Антрацит	31425	Киноплёнка	
Бензин	46928	триацетатная	18779
Бумага	13408	целлулоидная	16760
Бурый уголь	8380 – 25140	Кокс	29330 – 33520
Винипласт	18105	Крахмал	17510
Волокно		Мазут	38129 – 41900
вискозное	15512	Масло	
капроновое	31132	соляровое	43069
лавсан	22584	Нефть сырая	43576 – 46090

Продолжение таблицы

нитрон	30755	Пенополиуретан	24320
Древесина		Полипропилен	45671
свежая W= 50 %	7150	Полистирол	38967
воздушносухая	14665	Полиэтилен	47138
Ископаемый		Резина	33520
Уголь	25140 – 35615	Сланцы	5782 – 11564
Карболит	25978	Оргстекло	27737
Каучук		Топливо Т-1	42948
натуральный	42319	Топливо Т-2	43157
синтетический	37710	Торф сухой	27654
Капролактам	29749	Торф W = 10 %	16613
Керосин	41481 – 46090	Целлюлоза	17300

Приложение 3

Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении

Температура, t ⁰ C	Теплосодержание, кДж/кмоль					
	O ₂	N ₂	Воздух	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
100	2956,0	2917,0	2917,5	3814,1	1281,7	4081,1
200	5991,7	5849,3	5866,0	8019,6	6829,7	8505,7
300	9125,8	8819,9	8861,8	12536,5	10378,6	13223,6
400	12360,5	11849,3	11924,7	17313,1	14044,9	18167,8
500	15678,9	14945,7	15058,8	22303,4	17828,4	23275,4
600	19072,9	18104,9	18255,8	27473,8	21733,5	28533,9
700	22521,2	21331,3	21524,0	32795,1	25772,7	33876,1
800	26019,9	24616,2	24842,5	38237,9	29937,5	39285,5
900	29564,6	27955,7	28211,3	43785,5	34232,3	44799,5

Продолжение таблицы

1000	33142,9	31337,0	31621,9	49442,0	38648,5	50321,9
1100	36750,5	34760,2	35074,5	55140,4	43198,9	55907,2
1200	40391,6	38221,2	38560,6	60922,6	47807,9	61492,4
1300	44036,9	41719,8	42067,6	66788,6	52584,5	67161,5
1400	47724,1	45252,0	45629,1	72654,6	57403,0	72797,1
1500	51453,2	48771,6	49190,6	78562,5	62347,2	78436,8
1600	55182,3	52375,0	52794,0	84554,2	67333,3	84135,2
1700	58953,3	55936,5	56397,4	90545,9	72445,1	89821,0
1800	62766,2	59539,9	60000,8	96579,5	77598,8	95557,1
1900	66579,1	63143,3	63646,1	102613,1	82794,4	101184,3
2000	70392,0	66788,6	67333,3	108646,7	88073,8	107012,6
2100	74246,8	70433,9	71020,5	114722,2	93395,1	112715,2
2200	78101,6	74121,1	74707,7	120839,6	98758,3	118451,3
2300	81998,3	77766,4	78394,9	126915,1	104163,4	124220,9
2400	85936,9	81453,6	82124,0	133032,5	109631,3	130024,1
2500	89875,5	85140,8	85853,1	139149,9	115141,1	135756,0
2600	94015,2	89003,9	89330,8	145325,9	119398,2	141513,0
2700	97857,4	92653,5	93105,9	151481,1	124782,4	147295,2
2800	101833,7	96437,0	96789,0	157560,7	130342,5	152985,3
2900	106124,2	100488,7	100488,7	163795,5	135848,2	158813,6
3000	110113,2	103828,2	104205,3	169946,4	141161,1	164667,0

Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении

Температура, $t^{\circ}\text{C}$	Теплосодержание, кДж/м ³					
	O ₂	N ₂	воздух	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
100	131,8	130,1	130,1	170,1	150,6	181,4
200	267,2	260,9	261,6	357,7	304,7	377,9
300	407,1	393,6	395,4	559,7	463,0	587,0
400	551,4	528,7	532,1	772,6	626,8	824,6
500	669,3	666,6	672,0	925,1	786,2	1034,9
600	850,6	807,8	814,5	1225,6	969,5	1269,6
700	1004,7	951,9	960,3	1463,1	1149,7	1507,5
800	1160,6	1098,2	1108,2	1706,2	1335,3	1746,4
900	1319,0	1246,9	1258,7	1953,8	1527,2	1994,8
1000	1478,6	1398,2	1410,7	2205,2	1724,2	2237,4
1100	1639,5	1551,1	1564,9	2460,4	1926,5	2488,8
1200	1802,1	1705,3	1720,4	2718,5	2133,9	2735,2
1300	1965,1	1861,2	1877,5	2979,1	2345,5	2979,5
1400	2129,8	2010,0	2035,5	3241,4	2560,9	3238,0
1500	2295,7	2176,7	2194,7	3505,7	2781,3	3488,2
1600	2462,4	2335,5	2355,2	3771,4	3004,2	3747,5
1700	2630,5	2495,9	2515,7	4039,6	3231,7	4003,1
1800	2799,7	2656,4	2678,2	4307,3	3461,3	4261,2
1900	2969,4	2818,2	2840,4	4579,7	3693,5	4529,8
2000	3140,8	2979,9	3004,2	4847,8	3928,5	4667,6
2100	3311,7	3142,9	3167,6	5118,2	4166,1	5059,4
2200	3497,8	3306,3	3332,3	5392,5	4405,8	5337,2

Продолжение таблицы

2300	3659,1	3469,3	3497,4	5660,7	4667,1	5608,7
2400	3834,3	3633,1	3663,3	5933,0	4890,9	5892,8
2500	4009,8	3797,4	3828,8	6209,6	5136,5	6169,8
2600	4184,9	3953,9	3988,4	6487,4	5387,1	6460,1
2700	4368,9	4135,9	4156,5	6761,8	5639,3	6753,8
2800	4546,1	4304,4	4320,7	7033,3	5897,8	7050,9
2900	4729,2	4469,0	4484,9	7311,1	6159,3	7351,3
3000	4914,9	4634,5	4652,1	7589,7	6425,8	7655,1

Приложение 5

Таблица № 16

№ вар.	Вещество	t _{всп}	НКПР, %	A	B	C	ρ _ж , кг/м ³	P _{max} , кПА	L, м	B, м	H, м	T _в , °C	U, м/с	V _{ап} , м ³	ε	T _ж , °C	τ, ч.
1	Амелацетат C ₇ H ₁₄ O ₂	+ 43	1,08	6,29350	1579,510	221,365	875,6	735	25	25	5	15	0,1	0,03	0,78	38	5
2	Амилен C ₅ H ₁₀	- 18	1,49	5,91048	1014,294	229,783	637	780	10	12	4	15	0,2	0,04	0,66	37	1,0
3	Амиловый спирт C ₅ H ₁₂ O	+ 48	1,46	6,3073	1287,625	161,330	881	737	18	15	3	17	0,3	0,05	0,91	36	0,9
4	Ацетальдегид C ₂ H ₄ O	- 40	4,12	6,31653	1093,537	233,413	783,4	648	22	17	4	18	0,1	0,06	0,83	35	1,0
5	Ацетон C ₃ H ₆ O	- 18	2,7	6,37551	1281,721	237,088	790,8	572	30	20	5	19	0,2	0,07	0,76	34	0,5
6	Бензол C ₆ H ₆	- 11	1,43	5,61391	902,275	178,009	873,68	882	28	16	6	20	0,3	0,08	0,93	33	0,7
7	Бутилацетат C ₆ H ₁₂ O ₂	+ 29	1,35	6,25205	1430,418	210,475	882,5	755	25	15	5	21	0,1	0,03	0,78	34	1,2
8	Бутиловый спирт C ₄ H ₁₀ O	+ 35	1,8	8,72232	266,684	279,638	805,5	716	28	20	4	22	0,2	0,04	0,68	35	1,5
9	Гексан C ₆ H ₁₄	- 23	1,24	5,99517	1166,274	223,661	654,81	848	32	24	5	23	0,3	0,05	0,54	35	1,3
10	Гептан C ₇ H ₁₆	- 4	1,07	6,07647	1295,405	219,819	683,76	843	40	20	6	24	0,1	0,06	0,62	37	1,0
11	N,N - демитилформа- мид C ₃ H ₇ ON	+ 55	2,35	6,15939	1482,985	204,342	950	618	38	24	3	25	0,2	0,07	0,73	38	1,1
12	1,4 - диоксан	+ 11	2,0	6,64091	1632,425	250,725	1033	820	25	25	4	26	0,3	0,08	0,81	39	0,8

	$C_4H_8O_2$																
13	1,2-дихлорэтан $C_2H_4Cl_2$	+ 9	6,2	6,78615	1640,179	259,715	1253	647	30	20	5	27	0,1	0,03	0,77	40	0,5
14	Диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$	- 41	1,7	6,12270	1098,945	232,372	713,5	720	24	18	6	28	0,2	0,04	0,62	41	0,7
15	Изобутиловый спирт $C_4H_{10}O$	+ 28	1,8	7,83005	2058,392	245,642	803,6	744,8	28	14	3	29	0,3	0,05	0,68	42	1,0
16	Изопропилов- ый спирт C_3H_8O	+ 14	2,23	7,51055	1733,0	232,380	784,4	634	35	25	4	30	0,1	0,06	0,73	43	1,2
17	Метиловый спирт CH_3OH	+ 6	6,98	7,3527	1660,464	245,818	786,9	620	22	12	5	20	0,2	0,07	0,78	38	1,3
18	Пентан C_5H_{12}	- 41	1,47	5,97208	1062,555	231,805	621,4	843	36	32	6	21	0,3	0,08	0,82	39	1,5
19	Пиридин C_5H_5N	+ 20	1,8	5,91684	1217,730	196,342	978	960	42	36	5	22	0,1	0,06	0,66	40	1,0
20	Стирол C_8H_8	+ 30	1,1	7,06542	2113,057	272,986	901,7	647	30	20	4	23	0,2	0,06	0,73	41	1,2

Локальный электронный методический материал

Лебедев Сергей Анатольевич

ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

Редактор И. Голубева

Локальное электронное издание

Уч.-изд. л. 5,5. Печ. л. 4,9.

Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Калининградский государственный технический университет»,
236022, Калининград, Советский проспект, 1