



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

**С.А. Крылова  
И.В. Понурко**

## **ВВЕДЕНИЕ В НАПРАВЛЕНИЕ «ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ»**

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве практикума*



Магнитогорск  
2019

УДК 66.01 (075.8)  
ББК 35.115я73

**Рецензенты:**

кандидат технических наук,  
учитель химии МОУ «Средняя общеобразовательная школа № 8»,  
г. Магнитогорск  
**Х.Я. Гиревая**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры стандартизации, сертификации  
и технологии продуктов питания,  
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический  
университет им. Г. И. Носова»  
**Л.Г. Коляда**

**Крылова С.А., Понурко И.В.**

**Введение в направление «Химическая технология»** [Электронный ресурс] : практикум / Светлана Александровна Крылова, Ирина Витальевна Понурко ; ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – Электрон. текстовые дан. (1,58 Мб). – Магнитогорск : ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2019. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования : IBM PC, любой, более 1 GHz ; 512 Мб RAM ; 10 Мб HDD ; MS Windows XP и выше ; Adobe Reader 8.0 и выше ; CD/DVD-ROM дисковод ; мышь. – Загл. с титул. экрана.

Практикум составлен в соответствии с программой обучения в высших учебных заведениях по дисциплине «Введение в направление» (направление 18.03.01 «Химическая технология») и предназначен для студентов очной и заочной форм обучения. Практикум включает в себя общие сведения о современном состоянии химической промышленности в России, расчетные задания и примеры, нацеленные на приобретение и развитие у студентов первоначальных навыков, связанных с выполнением химико-технологических расчетов, контрольные вопросы и тесты для самостоятельной работы.

УДК 66.01 (075.8)  
ББК 35.115я73

© Крылова С.А., Понурко И.В., 2019  
© ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова», 2019

## Содержание

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                               | 4  |
| Условные обозначения основных параметров и переменных.....                                                   | 5  |
| 1. Химическая промышленность и химическая технология.....                                                    | 6  |
| 1.1. Химическая промышленность. Общие сведения.....                                                          | 6  |
| 1.2. Химическая технология и химико-технологический процесс .....                                            | 11 |
| 1.3. Показатели эффективности .....                                                                          | 15 |
| 2. Основные законы газового состояния.....                                                                   | 19 |
| 3. Содержание компонентов в смеси.....                                                                       | 24 |
| 4. Стехиометрические расчеты .....                                                                           | 28 |
| 5. Топливо. Его элементарный состав и свойства.....                                                          | 33 |
| 6. Процессы горения .....                                                                                    | 39 |
| 6.1. Расчет теплоты сгорания топлива .....                                                                   | 40 |
| 6.2. Расчет количества воздуха, необходимого для горения .....                                               | 42 |
| 6.3. Пределы воспламенения газовых смесей .....                                                              | 48 |
| 7. Величины, применяемые в технохимических расчетах. правила вычисления .....                                | 50 |
| 8. Условие значимости цифр. Правила вычисления.....                                                          | 58 |
| 9. Задания для самостоятельного решения.....                                                                 | 67 |
| 10. Контрольные вопросы. Тесты .....                                                                         | 75 |
| 11. Примерные темы рефератов и презентаций .....                                                             | 84 |
| Заключение.....                                                                                              | 86 |
| Библиографический список.....                                                                                | 87 |
| Приложение .....                                                                                             | 88 |
| Таблица П1                                                                                                   |    |
| Плотность растворов серной кислоты (20 <sup>0</sup> С) .....                                                 | 89 |
| Таблица П2                                                                                                   |    |
| Плотность растворов азотной кислоты (20 <sup>0</sup> С) .....                                                | 90 |
| Таблица П3                                                                                                   |    |
| Пределы воспламенения газов в воздушных смесях при атмосферном давлении и температуре 20 <sup>0</sup> С..... | 91 |

## ВВЕДЕНИЕ

Химическая промышленность играет важную роль как в мировой экономике, так и в экономике России, оказывая значительное влияние на ключевые отрасли промышленности, строительства и сельского хозяйства. Химические технологии, являясь основой для производства большинства современных материалов, чрезвычайно важны в контексте вопросов технологического развития, экономического роста и обеспечения национальной безопасности нашей страны.

В перечень мероприятий по реализации Стратегии развития химического и нефтехимического комплекса РФ на период до 2030 года [1], направленных на выполнение ее ключевых задач, входит и кадровое обеспечение. Выработка эффективной кадровой политики включает в себя, в том числе, целевой набор студентов и их подготовку по профессиям в соответствии с потребностями предприятий химического комплекса.

Целью освоения дисциплины «Введение в направление» согласно образовательной программе по направлению 18.03.01 "Химическая технология" является формирование у студентов начальных знаний и основных понятий в области химической технологии для раскрытия ее социальной, экономической и экологической значимости для России.

Практикум содержит общие сведения о современном состоянии химической промышленности в России, ее проблемах и путях развития, основные понятия и законы, используемые в химической технологии. Данный практикум нацелен на приобретение и развитие у студентов первоначальных навыков, связанных с выполнением химико-технологических расчетов. В соответствующих разделах приведены примеры выполнения расчетных заданий, а также дополнительные задания (с ответами) для решения на практических занятиях. Особое внимание уделено размерностям основных и вспомогательных величин, их правильного применения в расчетах, а также основным правилам округления величин при выполнении расчетов и представлении экспериментальных данных.

Представленный материал, базируется, прежде всего, на знаниях, умениях и навыках, полученных обучающимися в результате изучения дисциплин "Химия", "Физика", "Математика", предусмотренных школьными программами. Дисциплина "Введение в направление" дает начальные знания по основным понятиям направления "Химическая технология" и приемам расчетов, используемым при изучении ряда последующих дисциплин программы бакалавриата 18.03.01: "Общая химическая технология", "Химические реакторы", "Процессы и аппараты химической технологии", "Химическая технология топлива и углеродных материалов", "Коксование углей", "Извлечение и переработка химических продуктов коксования" и др.

Для более углубленного изучения материала, а также для подготовки рефератов и презентаций можно использовать источники, на которые даны ссылки в соответствующих разделах.

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ПЕРЕМЕННЫХ

Единицы измерения представленных ниже величин выражены через соответствующие единицы международной системы (СИ).

A - зола топлива, %  
 $C_i$  - концентрация  $i$ -го вещества, моль/м<sup>3</sup>;  
 $D_{1/2}$  - плотность первого газа по второму;  
 $E_R$  – выход продукта R;  
F - площадь, м<sup>2</sup>;  
k - константа скорости химической реакции (с<sup>-1</sup> если n=1, м<sup>3</sup>/(моль·с) если n=2 и т.д.);  
M - молярная масса, кг/моль;  
m - масса, кг;  
 $n_i$  - количество вещества, моль;  
 $P(p_i)$  – давление газа (парциальное давление газа), Па;  
Q - теплота, Дж;  
 $S_R$  и  $S_R'$  – интегральная и дифференциальная селективность по целевому продукту R;  
T – температура, К;  
V - выход летучих веществ в топливе, %  
V – объем, м<sup>3</sup>;  
 $V_\mu$  - объем одного моля газа, м<sup>3</sup>/моль;  
W - влажность топлива, %  
 $x_i$  – степень превращения  $i$ -го вещества;  
 $\alpha$  - коэффициент избытка воздуха;  
 $\varphi$  - объемное содержание компонента в газовой смеси, об. доли, об.%;  
 $\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\tau$  - время, с;  
 $\omega$  - массовое содержание компонента в смеси, масс. доли, масс.%.

### Сокращения

ХТП - химико-технологический процесс;  
И – интенсивность;  
П – производительность;  
н.у. - нормальные условия;  
ЗДМ - закон действующих масс.

# 1. ХИМИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ И ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

## 1.1. Химическая промышленность. Общие сведения

**Химическая промышленность** - отрасль промышленности, включающая производство продукции из минерального, углеводородного и другого сырья путём его химической переработки.

Химическая промышленность является одной из ведущих отраслей мировой экономики. Ассортимент выпускаемой продукции чрезвычайно разнообразен. Важнейшими химическими продуктами являются минеральные удобрения, ядохимикаты, кислоты и щёлочи, лаки и краски, синтетические волокна, пластмассы, синтетический каучук, многочисленные производные углеводородов и др. В зависимости от вида и группы получаемых продуктов различают подотрасли химической промышленности (табл.1).

Таблица 1

Подотрасли химической промышленности

| Подотрасль             | Примеры                                                                 |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Неорганическая химия   | Производство аммиака, содовые производства, сернокислотные производства |
| Органическая химия     | Фенол, акрилонитрил, окись этилена, карбамид                            |
| Керамика               | Силикатные производства                                                 |
| Нефтехимия             | Бензол, этилен, стирол                                                  |
| Агрохимия              | Удобрения, пестициды                                                    |
| Полимеры               | Полиэтилен, полиэстер, бакелит                                          |
| Эластомеры             | Резина, неопрен, полиуретаны                                            |
| Взрывчатые вещества    | Нитроглицерин, нитрат аммония, нитроцеллюлоза                           |
| Фармацевтическая химия | Лекарственные препараты                                                 |
| Парфюмерия, косметика  | Кумарин, ванилин, камфора                                               |

Химическая промышленность является стратегической составляющей промышленности России и имеет огромное общехозяйственное и оборонное значение для развития экономики страны [1].

Предприятия химической промышленности размещены по территории России очень неравномерно: более 90% - в европейской части, причём предприятия основной химии концентрируются преимущественно на Урале, химии органического синтеза и химии полимеров — в Поволжье, в Центральной России находятся предприятия различной специализации с возрастающей ролью новейших отраслей химической промышленности.

- На размещение предприятий оказывают влияние следующие факторы:
- потребительский (наличие потребителей);
  - сырьевой (расположение месторождений полезных ископаемых);
  - водный (наличие водных ресурсов);
  - транспортный (близость удобных транспортных развозок);
  - энергетический (наличие источников энергии и цена энергоресурсов);
  - экологический.

На территории России сформировались четыре химических базы: Центральная, Волго-Уральская, Сибирская и Северо-Европейская (рис. 1). Наиболее крупные российские предприятия по производству химической продукции представлены в табл.2.

Таблица 2

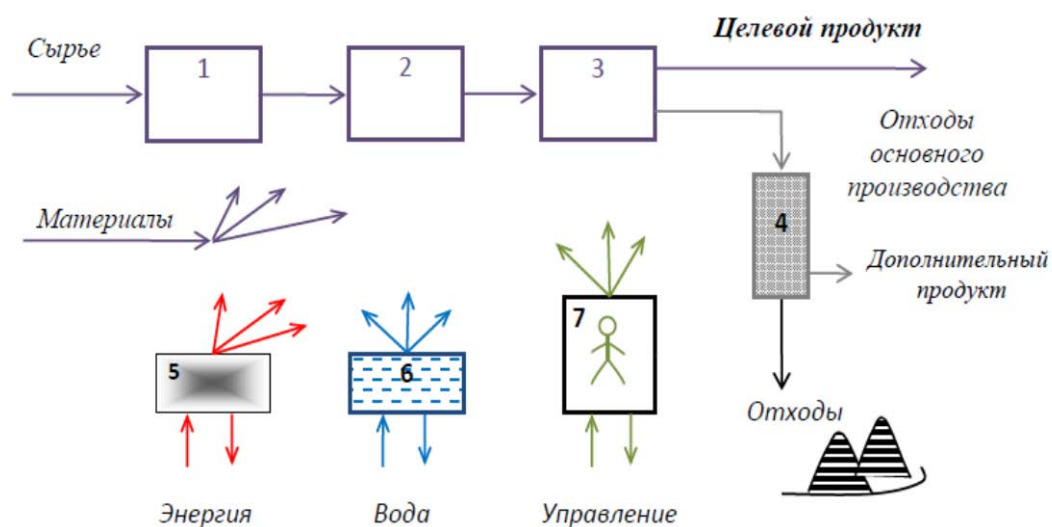
Крупнейшие российские предприятия по производству химической продукции

| Предприятия                                   | Специализация                                                      |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Сибур Холдинг (Москва)                        | Нефтехимия                                                         |
| Салаватнефтеоргсинтез (Салават, Башкортостан) | Нефтехимия                                                         |
| Нижнекамскнефтехим (Нижнекамск, Татарстан)    | Нефтехимия, синтетические каучуки                                  |
| Еврохим (Москва)                              | Производство удобрений                                             |
| Уралкалий (Березники, Пермский край)          | Калийные удобрения                                                 |
| Акрон (Великий Новгород)                      | Минеральные удобрения                                              |
| ФосАгро-Череповец                             | Фосфорсодержащие соли и удобрения                                  |
| Казаньоргсинтез                               | Полиэтилен, фенол, ацетон                                          |
| Тольяттиазот                                  | Аммиак, карбамид, углекислота                                      |
| Куйбышевазот                                  | Капролактam и продукты его переработки, аммиак, азотные удобрения. |
| Минудобрения (Россошь, Воронежская область)   | Аммиак, аммиачная селитра, нитроаммофоска, азотная кислота         |



Рис. 1. География химической промышленности России

Общая структура химического производства и его функциональные элементы представлены на рис. 2.



1- подготовка сырья; 2- переработка сырья; 3- выделение целевого продукта; 4 - санитарная очистка и утилизация отходов; 5 - энергетическая система; 6 - система подготовки вспомогательных материалов и водоподготовка; 7 - система управления.

Рис. 2. Структура и функциональные элементы химического производства

Материалы по общим вопросам химической технологии можно найти в [2]. Теоретические основы химической технологии изложены в [3-6].

### *Проблемы химической промышленности России*

Очень важной проблемой является неблагоприятное экологическое воздействие предприятий химического комплекса вследствие многообразия выделяющихся в процессе производства вредных веществ и недостаточной очисткой от них отработанных потоков.

Проблемы, связанные с нестабильным функционированием химического комплекса сводятся, в основном, к следующему:

- высокая степень физического износа оборудования, который происходит быстрее, чем в большинстве других отраслей и связан с высокой агрессивностью среды, комплексным воздействием различных нагрузок и часто непрерывным режимом работы оборудования;
- использование устаревших технологий;
- дефицит инвестиционных ресурсов;

—опережающие темпы роста цен и тарифов на продукцию естественных монополий;

—нестабильное обеспечение предприятий базовыми видами сырья, особенно углеводородного;

—недостаточная емкость внутреннего рынка химической продукции.

Основным документом, определяющим развитие химической промышленности в России, является Приказ Министерства промышленности и торговли РФ и Министерства энергетики РФ от 14 января 2016 г. № 33/11 “О внесении изменений в Стратегию развития химического и нефтехимического комплекса на период до 2030 года, утвержденную приказом Минпромторга России и Минэнерго России от 8 апреля 2014 г.” Целью Стратегии является повышение конкурентоспособности химического комплекса России и обеспечение отраслей промышленности качественной отечественной продукцией.

Для достижения поставленной цели, первоочередными задачами, требующими решения являются:

—техническое перевооружение предприятий;

—применение новейших технологий, способных обеспечить комплексное использование сырья и рост эффективности производства;

—обеспечение экологической безопасности: сокращение выбросов и утилизация отходов;

—финансирование приоритетных направлений развития.

За довольно длительный срок своего исторического развития (первое предприятие по производству серной кислоты было открыто в Великобритании в 1736 г.) химическая промышленность претерпела значительные изменения. Совершенствование техники, технологии, а также организации производства продолжается и в наше время: количество инноваций из года в год увеличивается в геометрической прогрессии.

С основами производства, проблемами и тенденциями технического развития азотной промышленности, например, можно ознакомиться по источникам [7-9].

Главными причинами, которые обуславливают эволюцию химического производства, являются:

— научные исследования;

— появление новых материалов;

— развитие технологий.

Развитие современной химической промышленности осуществляется по следующим направлениям:

1. Создание крупномасштабных производств новых видов химических продуктов и сырья многоцелевого назначения. Такими продуктами являются, например, молекулярный водород, аммиак, метанол, гидразин, которые выполняют роль как химических компонентов, так и вторичных

энергоносителей. Особое значение среди этих веществ имеет водород. Наиболее перспективные технологические процессы использования водорода – синтез аммиака и метанола, синтез жидких и газообразных углеводородов (искусственное жидкое топливо, метан), гидрогазификация твёрдых топлив, прямое восстановление руд чёрных и цветных металлов, водородная энергетика и др.

2. Увеличение использования возобновляемых источников сырья и энергии, особенно биомассы, может быть использована для получения водорода, газообразных и жидких углеводородов и химического сырья.

3. Увеличение производства продуктов питания, в том числе за счёт применения высокоэффективных минеральных удобрений, ядохимикатов, стимуляторов роста растений и животных и др.

4. Развитие малотоннажной химии. В эту группу входят продукты, выпускаемые в сравнительно малых количествах методами тонкого органического и неорганического синтезов с особо ценными, чаще всего заданными свойствами. К ним относятся, в частности: лакокрасочные материалы, синтетические красители, вспомогательные вещества для текстильной, кожевенной, меховой и других отраслей промышленности, химические реактивы и особо чистые вещества, поверхностно-активные вещества и др.

5. Развитие и расширение производства лекарственных препаратов, которое в значительной степени определяется успехами органической химии и органического синтеза.

6. Совершенствование и разработка новых эффективных способов очистки промышленных выбросов от вредных примесей и утилизации отходов. Главными направлениями решения экологических проблем являются комплексное использование сырья и внедрение малоотходных технологических процессов.

7. Развитие технологий переработки нефти, природного газа, угля, древесины и другого углеродсодержащего сырья.

## **1.2. Химическая технология и химико-технологический процесс**

**Технология** (от греч. technos - искусство, ремесло или производство; logos – учение, наука) - наука о способах и средствах проведения производственных процессов.

Различают механическую и химическую технологию. Процессы механической технологии основаны на механическом воздействии, которое изменяет внешний вид или физические свойства обрабатываемых веществ, но не влияет на их химический состав. Процессы химической технологии связаны с протеканием химических реакций, приводящих к изменению состава, а также внутреннего строения и свойств веществ. Например, обработка древесины для

получения из неё стройматериалов относится к механической технологии, а обработка древесины для получения из неё бумаги, уксусной кислоты и других продуктов - к химической технологии. Процессы обработки металла ковкой, литьем, прокаткой для получения различных предметов и деталей относятся к механической технологии, а получение металлов из руд - к химической технологии.

**Химическая технология** - это естественная прикладная наука о способах и принципах производства продукции, осуществляемых с участием химических превращений техничеcки, экономически и социально целесообразным путем.

Химическая технология как наука имеет:

- объект исследования – химическое производство (способы и процессы переработки исходных веществ в полезные продукты);
- цель изучения – создание рациональных способов производства необходимых человеку продуктов;
- методы исследования – экспериментальный, моделирование и системный анализ.

Химическая технология решает следующие основные задачи:

- выбор способов и методов переработки сырья в готовые продукты;
- выбор конструкций аппаратов, машин и параметров их работы, а также взаимосвязь аппаратов между собой;
- управление технологическим процессом;
- обеспечение экологической безопасности производства.

Химическая технология базируется, прежде всего, на химических науках, таких как физическая химия, химическая термодинамика и химическая кинетика, а также на закономерностях физики, математики, общехимических и общетехнических дисциплин.

Из законов физики и химии можно выделить два основных закона: **закон сохранения массы вещества и закон сохранения энергии**. На их основе в химической технологии производят расчёты химико-технологических процессов, например, вычисляют материальный и тепловой балансы производства, выход готовой продукции, расходные коэффициенты по сырью и др.

В основе множества ХТП лежат обратимые реакции, протекание которых определяется законами действия масс, Вант-Гоффа, принципом Ле- Шателье.

**Закон действия масс** устанавливает взаимосвязь между скоростью химической реакции и концентрацией реагирующих веществ. Из закона действия масс вытекает ряд технологических приёмов. Например, для повышения скорости реакций и смещения равновесия обратимых реакций в сторону образования целевых продуктов используют концентрированные растворы. По мере расхода реагентов в процессе производства и разбавления растворов их систематически донасыщают. Для реакций, протекающих в

газовой фазе, применяют повышенные и высокие давления. Из гетерогенной системы реагирующих веществ отводят продукты реакции и т.д.

**Закон Вант-Гоффа** устанавливает взаимосвязь между температурой и направлением протекания обратимых реакций: если температура системы, находящейся в состоянии равновесия изменяется, то при повышении температуры равновесие смещается в сторону процессов, идущих с поглощением тепла (эндотермических), а при понижении температуры - в сторону процессов, идущих с выделением тепла (экзотермических). В зависимости от того, как протекает процесс, проводят охлаждение или нагревание реагирующей системы.

Закон действия масс и закон Вант-Гоффа представляют собой частные случаи общего закона, известного под названием **принципа Ле-Шателье**. Принцип Ле-Шателье является теоретической основой для выбора оптимальных условий, позволяющих наиболее экономично использовать сырьё и обеспечить максимальный выход целевой продукции заданного качества.

В химической технологии используются и другие законы физики и химии, например:

- газовые законы для приведения объёмов реагирующих газов к нормальным условиям (н.у.) и расчёта технологических процессов, протекающих в газовой фазе или с образованием газов;
- законы электролиза для расчётов электрохимических процессов;
- законы термохимии для расчётов экзо- и эндотермических процессов.

**Химико-технологический процесс (ХТП)** - последовательность химических и физико-химических процессов целенаправленной переработки исходных веществ в продукты.

На ХТП базируются многие отрасли промышленности: металлургия, пищевая, целлюлозно-бумажная, текстильная, стекольная, фармацевтическая, производство стройматериалов, а также производство энергии, защита окружающей среды и др.

ХТП можно классифицировать по различным принципам:

- 1) по сырью (например, технология угля, технология нефти, технология сланцев);
- 2) по продуктам (например, технология аммиака, технология красителей, технология удобрений);
- 3) по группам периодической системы элементов (например, технология щелочных металлов, технология галогенов, технология редкоземельных металлов);
- 4) по типам химических реакций и процессов (например, технология хлорирования, сульфирования, электролиза).

Чаще всего ХТП классифицируют одновременно по нескольким признакам.

Исторически химическую технологию подразделяют на технологию неорганических и органических веществ (табл. 3), хотя оба раздела технологии объединяются общими принципами и закономерностями.

Таблица 3

Производства технологии неорганических и органических веществ

| Технология неорганических веществ                                                                        | Технология органических веществ                                                                                                                                                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Производство основных химических веществ (неорганических кислот, щелочей, солей и минеральных удобрений) | Основной (тяжёлый) органический синтез (производство спиртов, органических кислот, альдегидов, кетонов, эфиров, органических растворителей, поверхностно-активных веществ, мономеров и др.) |
| Производство тонких неорганических продуктов (реактивы, редкие элементы, фармацевтические препараты)     | Тонкий органический синтез (производство фармацевтических препаратов, органических реактивов, красителей, душистых веществ и др.)                                                           |
| Электрохимические производства (производство хлора, щелочей, водорода)                                   | Производство высокомолекулярных веществ (пластмасс, искусственных и синтетических волокон, каучука)                                                                                         |
| электротермические производства (производство фосфора, карбида кальция)                                  | Переработка топлив (нефти, угля, горючих сланцев)                                                                                                                                           |
| Металлургия (производство чёрных, цветных, благородных металлов)                                         | Производство пищевых продуктов (сахара, белков, жиров, углеводов)                                                                                                                           |
| Производство силикатов и связующих веществ (производство стекла, цемента, извести, керамики)             | Биохимическое производство (производство спиртов, уксусной кислоты и др.)                                                                                                                   |
| Производство минеральных красок и пигментов                                                              |                                                                                                                                                                                             |

С технологической точки зрения такое деление условно, так как процессы получения неорганических и органических веществ имеют много общего. При производстве многих химических продуктов повторяются аналогичные процессы и методы. Одни связаны с определёнными химическими реакциями (типичные процессы), другие – с определёнными физическими процессами (типичные операции). Большинство технологических схем можно разделить на типовые процессы и операции, которые базируются на общих принципах и закономерностях (табл.4).

## Типовые процессы и операции химической технологии

| Типовые процессы          |                          |
|---------------------------|--------------------------|
| Горение                   | Сульфирование            |
| Окисление                 | Гидратация, гидролиз     |
| Нейтрализация             | Гидрирование             |
| Образование силикатов     | Алкилирование            |
| Каустификация             | Конденсация              |
| Электролиз                | Полимеризация            |
| Разложение                | Диазотирование           |
| Кальцинация, дегидратация | Брожение                 |
| Нитрование                | Пиролиз, крекинг         |
| Этерификация              | Ароматизирование         |
| Восстановление            | Изомеризация             |
| Аминирование              | Каталитический риформинг |
| Галогенирование           | Ионный обмен             |
| Типовые операции          |                          |
| Перемещение жидкостей     | Перемешивание            |
| Теплообмен                | Классификация, осаждение |
| Испарение                 | Фильтрование             |
| Увлажнение                | Просеивание              |
| Абсорбция                 | Кристаллизация           |
| Экстракция                | Центрифугирование        |
| Адсорбция                 | Измельчение              |
| Дистилляция, сублимация   | Хранение материалов      |
| Сушка                     |                          |

Теоретические основы типовых операций и соответствующую аппаратуру изучает дисциплина «Процессы и аппараты химической технологии».

### 1.3. Показатели эффективности

Эффективность организации и осуществления химического производства и ХТП оценивают по четырем группам показателей: технические; экономические; эксплуатационные; социальные.

## Технические показатели

**Производительность** – количество целевого продукта (G), производимое в единицу времени или переработанного сырья в единицу времени:

$$\Pi = G / \tau \quad (1)$$

Единицы измерения - кг/час, т/сут, т/год и т.п.

**Мощность** - максимально возможная производительность.

**Интенсивность** - это производительность, отнесенная к какой-либо величине, характеризующей размеры аппарата - к его объему (V) или сечению (F):

$$I = \frac{\Pi}{V(\text{или } F)} = \frac{G}{V(\text{или } F) \cdot \tau} \quad (2)$$

Единицы измерения - кг/(час·м<sup>3</sup>), т/(сут·м<sup>2</sup>) и т.п.

**Степень превращения сырья** ( $x_i$ ) - отношение количества превратившегося исходного сырья  $i$  ( $n_{i0} - n_i$ ) к его начальному количеству  $n_{i0}$ . Например, для вещества А:

$$x_A = \frac{n_{A0} - n_A}{n_{A0}} \quad (3)$$

Степень превращения может принимать значения в пределах  $0 \leq x_i \leq 1$ .

**Селективность** (избирательность) полная, или **интегральная**,  $S_R$  показывает, какая доля превратившегося исходного вещества расходуется на образование заданного продукта R:

$$S_R = \frac{n_{A \rightarrow R}}{n_A^0 - n_A} \quad (4)$$

где  $n_A^0 - n_A$  - общее количество прореагировавшего вещества А.

**Дифференциальная селективность**  $S_R'$  - это отношение скорости превращения исходного вещества А в продукт R к общей скорости превращения А:

$$S_R' = \frac{w_R}{w_R + w_P + \dots} \quad (5)$$

где  $w_R, w_P$  - скорости образования продуктов R, P и др.

**Выход продукта** - это отношение количества полученного целевого продукта  $n_R$ , к максимально возможному его количеству  $n_{R,max}$ , которое могло бы быть получено при данных условиях осуществления химической реакции:

$$E_R = \frac{n_R}{n_{R,max}}. \quad (6)$$

Селективность процесса и выход продукта характеризуют эффективность химического процесса по использованию сырья для получения целевого продукта, если превращение происходит по сложной реакции с образованием нескольких продуктов.

В производственных условиях с целью уменьшения расхода сырья стремятся получить возможно более высокие значения степени превращения, селективности и выхода продукта.

**Удельные капитальные затраты** – затраты на оборудование, отнесенные к единице его производительности. Для организации производства необходимы единовременные затраты на аппараты, машины, трубопроводы, сооружения и прочее, т. е. капитальные затраты. Этот технический показатель характеризует эффективность организации процесса и производства в целом, совершенство используемых конструкций и выражается в натуральных величинах (например, [тонна металла/1000 тонн продукта в сутки]) или в денежном выражении.

**Качество продукта** - это совокупность свойств целевого продукта, которые определяют его потребительские свойства и товарную ценность. Качество химического продукта оценивается разными характеристиками, такими как содержание (состав и количество) примесей, физические и химические показатели, внешний вид и размеры, цвет, запах и т. д. Ключевым критерием качества химического продукта является степень его чистоты, определяемая содержанием основного вещества в продукте.

Качество регламентируется следующими нормативными документами: СТБ, ISO 9001, ГОСТ, ТУ, сертификатом качества.

### Экономические показатели

Среди экономических показателей наиболее значимыми являются себестоимость продукции, прибыль, и производительность труда.

**Себестоимость продукции** - суммарные затраты в денежном выражении на получение единицы продукта. Она включает в себя затраты на сырье, энергию, вспомогательные материалы, капитальные затраты, затраты на оплату труда и др.

**Прибыль** - разница между ценой и себестоимостью продукта, умноженная на объем производства. Для увеличения прибыли необходимо либо увеличить объем производства, либо снизить себестоимость продукции. Наиболее

эффективным способом повышения прибыли является снижение себестоимости, т.к. увеличение объема производства в условиях рыночной экономики зависит от возможностей сбыта продукта.

**Производительность труда** - количество продукции, произведенной в единицу времени (обычно за год) в расчете на одного работающего.

Экономические показатели определяют экономическую эффективность производства.

Экономические показатели рассчитывают на основе технических показателей.

Некоторые из них (производительность, расходные коэффициенты, удельные капитальные затраты) относят к технико-экономическим, т.к. их можно представить в денежном выражении.

### Эксплуатационные показатели

Эксплуатационные показатели характеризуют изменения, возникающие в ХТП при появлении отклонений от регламентированных условий и состояний. Основными эксплуатационными показателями являются надежность, безопасность функционирования, чувствительность, управляемость и регулируемость.

**Надежность** характеризуют средним временем безаварийной работы либо числом аварийных остановок оборудования за определенный отрезок времени.

**Безопасность функционирования** – вероятность нарушений, приводящих к нанесению вреда или ущерба обслуживающему персоналу, оборудованию, населению, окружающей среде.

**Чувствительность** к нарушениям режима и изменению условий эксплуатации; определяется отношением изменения показателей процесса к этим отклонениям.

**Управляемость и регулируемость** характеризуют возможность поддерживать показатели процесса в допустимых пределах, определяют величину допустимых изменений условий процесса.

### Социальные показатели

Социальные показатели определяют комфортность работы персонала на данном производстве и влияние производства на окружающую среду.

**Безвредность обслуживания** определяется санитарно-гигиеническими условиями производства для обслуживающего персонала, которые сравниваются с соответствующими нормами по загазованности, запыленности, уровню шума и т. д.

**Степень механизации и автоматизации** определяет долю ручного и тяжелого труда в эксплуатации производства.

**Экологическая безопасность** характеризует степень воздействия производства на окружающую среду и экологическую обстановку в регионе.

В настоящее время развитие промышленности достигло такого уровня, когда вопросы экологической безопасности становятся не менее важными и значимыми, чем те задачи, которые решаются при организации работы любого промышленного предприятия. Безопасность предприятия для окружающей среды и населения имеет тенденцию стать определяющим критерием конкурентоспособности предприятия в данном регионе.

## 2. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ГАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ

При выполнении химико-технологических расчетов широко пользуются газовыми законами, которые выражают связь трех параметров – давления, объема и температуры, характеризующих физическое состояние газа.

Состояние газа называют *идеальным*, если можно пренебречь размерами молекул и силами взаимодействия между ними. Такому состоянию при *нормальных условиях* (н.у. -  $0^{\circ}\text{C}$  или  $273\text{ K}$  и  $101,3\text{ кПа}$ ) соответствуют все одноатомные газы (гелий, аргон и др), при температурах  $100\text{--}200^{\circ}\text{C}$  – двухатомные газы ( $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  и др.), при некотором разрежении или высокой температуре ( $300\text{--}400^{\circ}\text{C}$  и выше) – трех- и четырехатомные газы ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$  и др.).

Газы, которые отклоняются от идеального состояния, называются *реальными*. Чем больше плотность газа и масса его частиц, тем больше взаимодействие между частицами и тем больше газ отклоняется от идеального состояния. Реальные газы описываются уравнением состояния идеального газа только приближенно, и отклонения от идеального поведения становятся заметными при высоких давлениях и низких температурах, особенно когда газ близок к конденсации.

Ниже рассмотрены газовые законы, которым строго подчиняются только идеальные газы. Однако, в технических расчетах этими законами с достаточной точностью можно пользоваться для любых газов до пределов их критических констант<sup>1</sup>.

### *Уравнение Менделеева - Клапейрона*

**Уравнение Менделеева - Клапейрона** (1834 г.) устанавливает связь между объемом  $V$ , давлением  $P$  и абсолютной температурой  $T$  для газа:

---

<sup>1</sup> Для каждого газа существует определенная максимальная температура, при которой можно превратить газ в жидкость при помощи давления. При температуре более высокой, чем эта температура, газ остается веществом газообразным и ни при каком давлении не превращается в жидкость. Эта температура называется *критической температурой газа*, а давление, которым при критической температуре можно газ превратить в жидкость, *критическим давлением*.

$$P \cdot V = nRT \quad (7)$$

где:  $n = \frac{m}{M}$ ;

$n$  – число молей газа ;

$P$  – давление газа, Па;

$V$  – объем газа, м<sup>3</sup>;

$T$  – абсолютная температура газа, К;

$R$  – универсальная газовая постоянная 8,314 Дж/(моль·К).

Из уравнения Менделеева - Клапейрона следуют три закона:

1. **Закон Шарля:** *давление газа фиксированной массы и фиксированного объема прямо пропорционально абсолютной температуре газа.*

Для одного и того же вещества при двух различных условиях, закон можно записать в виде:

$$V = \text{const} \Rightarrow \frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}, \quad (8)$$

2. **Закон Гей-Люссака:** *для одного и того же газа при постоянном давлении изменение объема прямо пропорционально температуре:*

$$P = \text{const} \Rightarrow \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}, \quad (9)$$

3. **Закон Бойля-Мариотта:** *при постоянной температуре объем данного количества газа обратно пропорционален давлению, под которым он находится:*

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{P_2}{P_1}, \quad (10)$$

отсюда

$$T = \text{const} \Rightarrow P_1 V_1 = P_2 V_2. \quad (11)$$

Учитывая, что удельные объемы газа обратно пропорциональны плотностям, можно записать

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{T_2}{T_1}, \quad (12)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  - плотности газа соответственно при давлениях  $P_1$  и  $P_2$ .

Объединяя законы Бойля - Мариотта и Гей-Люссака, можно получить следующее уравнение:

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} \text{ или } \frac{p \cdot V}{T} = \text{const} , \quad (13)$$

которое является математическим выражением *объединенного газового закона*. Значение постоянной в правой части этого уравнения зависит от количества газа. Если количество газа равно 1 моль, то соответствующая постоянная обозначается буквой  $R$  и называется газовой постоянной. Если давление выражено в атмосферах, то эта постоянная имеет значение 8,314 Дж/(моль·К), т.е. объединенный газовый закон для одного моля газа имеет вид

$$\frac{p \cdot V_\mu}{T} = R, \quad (14)$$

где  $V_\mu$  - объем одного моля газа.

Для  $n$  моль газа получается уравнение

$$\frac{p \cdot V}{T} = nR \text{ или } p \cdot V = nRT \text{ (уравнение Менделеева – Клапейрона)}. \quad (15)$$

### Закон Авогадро

**Закон Авогадро:** в равных объёмах различных газов, взятых при одинаковых температурах и давлениях, содержится одно и то же количество молекул.

Из этого закона вытекают 2 следствия.

1. Один моль любого газа при одинаковых условиях занимает один и тот же объем:

$$\frac{V_1}{n_1} = \frac{V_2}{n_2} = \dots . \quad (16)$$

В частности, при нормальных условиях, то есть при 0 °С (273 К) и 101,3 кПа, **объём 1 моля газа равен 22,413 (962) л**. Этот объём называют *молярным объемом* газа  $V_m$  (л/моль).

Один моль вещества содержит  $6,02 \cdot 10^{23}$  частиц этого вещества, обозначается  $N_A$  и носит название “число Авогадро”.

2. Массы равных объемов двух газов при одинаковых условиях (t, P) относятся друг к другу как их молярные массы

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{M_1}{M_2}. \quad (17)$$

Это отношение называется плотностью первого газа по второму (обозначается буквой D):

$$D_{1/2} = \frac{M_1}{M_2}, \quad (18)$$

Закон Авогадро позволяет определить плотность любого газа при н.у. по молекулярной массе

$$\rho = \frac{M}{V_m}, \quad (19)$$

### Закон Дальтона

Смесь газов подчиняется закону Дальтона, согласно которому *общее давление смеси равняется сумме давлений отдельных компонентов, образующих смесь, т.е. сумме парциальных давлений.*

$$P = p_1 + p_2 + \dots + p_n \quad (20)$$

*Парциальным давлением* называется давление, которое имеет каждый газ в объеме смеси при температуре смеси. При этом парциальное давление каждого компонента равняется общему давлению, умноженного на величину объемного содержания данного компонента в смеси (мольная доля)

$$p_i = \varphi_i \cdot P \quad (21)$$

Аналогично закону Дальтона, Амага предложил **закон аддитивности** парциальных объемов, согласно которому *общий объем газовой смеси равняется сумме парциальных объемов компонентов смеси:*

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (22)$$

Под парциальным объемом компонента идеальной газовой смеси понимается объем, который занимал бы данный компонент при отсутствии

остальных, находясь в таком же количестве, под тем же давлением и при той же температуре, что и в смеси.

**Пример 1.** Какой объем занимает кислород массой 8 г при 28 °С и давлении 744 мм рт. ст.

Решение. Из уравнения Менделеева-Клапейрона выразим объем кислорода

$$V = \frac{m \cdot R \cdot T}{M \cdot P}.$$

Переведем давление в Па: 744 мм рт.ст. = 99191,9 Па и подставим в формулу

$$V = \frac{8 \cdot 8,314 \cdot (28 + 273)}{32 \cdot 99191,9} = 0,0063 \text{ м}^3 = 6,3 \text{ дм}^3.$$

Ответ: 6,3 дм<sup>3</sup>.

**Пример 2.** Плотность некоторого газа (н.у.) равна 2,857 г/л. Рассчитайте:

- а) молярную массу газа;
- б) плотность газа по воздуху.

Решение. Воспользуемся уравнением (19) из которого выразим молярную массу газа

$$\rho = \frac{M}{V_m} \Rightarrow M = \rho V_m = 2,857 \cdot 22,4 = 64 \text{ г / моль}$$

Плотность газа по воздуху определим по уравнению (18)

$$D_{\text{газа/возд}} = \frac{\rho_{\text{газа}}}{\rho_{\text{возд}}} = \frac{M_{\text{газа}}}{M_{\text{возд}}} = \frac{64}{29} = 2,207$$

Ответ: 64 г/моль; 2,207.

**Пример 3.** Котел для кипения воды емкостью 8 л выдерживает давление  $1,013 \cdot 10^8$  Па. При какой температуре котел взорвется, если в нем находится 5 кг водяного пара?

Решение. Из уравнения Менделеева-Клапейрона выразим температуру и подставим значения величин

$$T = \frac{M \cdot P \cdot V}{m \cdot R} = \frac{18 \cdot 1,013 \cdot 10^8 \cdot 0,008}{5000 \cdot 8,314} = \frac{18 \cdot 1,013 \cdot 10^2 \cdot 8}{5 \cdot 8,314} = 351 \text{ K} = 73^\circ \text{C}.$$

Ответ: выше  $73^\circ \text{C}$ .

*Решить дополнительно*

**2.1.** В автоклав, наполненный водородом при  $25^\circ \text{C}$  и 99 кПа, поместили 20 мл этилового спирта (плотность спирта 0,8 г/мл). После нагревания автоклава до  $352^\circ \text{C}$  спирт полностью испарился. Определить давление в автоклаве, если его объем 2 дм<sup>3</sup>. (1,11 МПа).

**2.2.** Продукты сгорания имеют в начале дымохода температуру  $1200^\circ \text{C}$ , а в конце  $250^\circ \text{C}$ . Во сколько раз отличается объем газов в начале и в конце дымохода, если давление не меняется? (2,8 раза).

### 3. СОДЕРЖАНИЕ КОМПОНЕНТОВ В СМЕСИ

Массовое содержание компонентов смеси рассчитывают в долях по формуле

$$\omega_i = \frac{m_i}{m_{см}}$$

или в %:

$$\omega_i = \frac{m_i \cdot 100}{m_{см}}, \quad (23)$$

где  $m_i$  - масса  $i$ -го компонента, г;

$m_{см}$  - масса смеси, г.

Объемное содержание компонентов газовой смеси рассчитывают по формулам:

$$\text{в долях: } \varphi_i = \frac{V_i}{V_{см}} \text{ или } \varphi_i = \frac{n_i}{n_{см}},$$

$$\text{в \%: } \varphi_i = \frac{V_i \cdot 100}{V_{см}} \text{ или } \varphi_i = \frac{n_i \cdot 100}{n_{см}} \quad (24)$$

где  $V_i$  - объем  $i$ -го компонента,  $\text{дм}^3$ ;  
 $V_{\text{см}}$  - объем газовой смеси,  $\text{дм}^3$ ;  
 $n_i$  - количество  $i$ -го компонента, моль;  
 $n_{\text{см}}$  - количество газовой смеси, моль.

Средняя молярная масса газовой смеси рассчитывается на основе молярных масс составляющих эту смесь газов и их объемных долей.

$$M_{\text{см}} = \varphi_1 M_1 + \varphi_2 M_2 + \dots + \varphi_n M_n$$

или

$$M_{\text{см}} = \frac{n_1 M_1 + n_2 M_2 + \dots + n_n M_n}{n_{\text{см}}}$$

( 25)

**Пример 4.** Полагая, что содержание (в объемных процентах) азота, кислорода и аргона в воздухе соответственно составляет 78, 21 и 1, рассчитайте среднюю молярную массу воздуха.

Решение.

$$M_{\text{возд}} = 0,78 \cdot M_r(N_2) + 0,21 \cdot M_r(O_2) + 0,01 \cdot M_r(Ar) =$$

$$0,78 \cdot 28 + 0,21 \cdot 32 + 0,01 \cdot 40 = 21,84 + 6,72 + 0,40 = 28,96$$

или приблизительно 29 г/моль.

Ответ: 29 г/моль.

**Пример 5.** Газовая смесь содержит 12 л  $\text{NH}_3$ , 5 л  $\text{N}_2$  и 3 л  $\text{H}_2$ , измеренных при н.у. Рассчитать объемные доли газов в этой смеси и ее среднюю молярную массу.

Решение. Общий объем смеси газов равен  $V = 12 + 5 + 3 = 20$  л. Объемные доли газов окажутся равными:

$$\varphi(\text{NH}_3) = 12:20 = 0,6; \varphi(\text{N}_2) = 5:20 = 0,25; \varphi(\text{H}_2) = 3:20 = 0,15.$$

Средняя молярная масса рассчитывается на основе объемных долей составляющих эту смесь газов и их молекулярных масс:

$$M_{\text{ср}} = 0,6 \cdot M(\text{NH}_3) + 0,25 \cdot M(\text{N}_2) + 0,15 \cdot M(\text{H}_2) = 0,6 \cdot 17 + 0,25 \cdot 28 + 0,15 \cdot 2 = 17,5.$$

Ответ: 0,6; 0,25; 0,15;  $M_{\text{ср}}=17,5$  г/моль.

**Пример 6.** Смесь кислорода и озона имеет плотность по водороду 17. Определить массовую и мольную долю кислорода в смеси.

Решение: найдем среднюю молярную массу газовой смеси по формуле (18)

$$M_{\text{см}} = D_{\text{см} / \text{H}_2} M_{\text{H}_2} = 17 \cdot 2 = 34 \text{ г / моль.}$$

Используя формулу (25) найдем соотношение между количеством  $\text{O}_2$  и  $\text{O}_3$  в смеси, обозначив их за  $x$  и  $y$  соответственно:

$$M_{\text{см}} = \frac{xM_{\text{O}_2} + yM_{\text{O}_3}}{x + y} = \frac{32x + 48y}{x + y} = 34$$

откуда  $x=7y$ .

Определим мольную долю кислорода в смеси по формуле (24)

$$\varphi_{\text{O}_2} = \frac{n_{\text{O}_2}}{n_{\text{см}}} = \frac{7y}{7y + y} = 0,875.$$

Определим массовую долю кислорода в смеси по формуле (23)

$$\omega_{\text{O}_2} = \frac{m_{\text{O}_2}}{m_{\text{см}}}.$$

Для этого выразим сначала массы

$$m_{\text{O}_2} = n_{\text{O}_2} \cdot M_{\text{O}_2} = 7y \cdot 32 = 224y.$$

$$m_{\text{O}_3} = n_{\text{O}_3} \cdot M_{\text{O}_3} = y \cdot 48 = 48y.$$

$$m_{\text{см}} = 224y + 48y = 272y.$$

Массовая доля кислорода в смеси будет

$$\omega_{\text{O}_2} = \frac{224y}{272y} = 0,824.$$

Ответ: 0,824; 0,875.

**Пример 7.** Воздух, подводимый к доменной печи, имеет следующий состав, об. %:  $O_2$  - 21,1;  $N_2$  - 77,2;  $H_2O$  - 1,7. Сколько нужно добавить к  $100\text{ м}^3$  воздуха кислорода, чтобы его концентрация в смеси стала 25 об. %?

Решение: примем первоначальный объем воздуха за  $100\text{ м}^3$ . Тогда, в нем содержалось,  $\text{м}^3$ :  $O_2$  - 21,1;  $N_2$  - 77,2;  $H_2O$  - 1,7. Пусть к воздуху добавили  $x\text{ м}^3$   $O_2$ . Тогда объем кислорода в смеси стал  $(21,1+x)\text{ м}^3$ , а объем всей смеси -  $(100+x)\text{ м}^3$ .

Выразим объемное содержание кислорода в смеси по формуле (24):

$$\varphi_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_{см}} = \frac{21,1+x}{100+x} \cdot 100 = 25,$$

откуда  $x=5,2\text{ м}^3$ .

Ответ:  $5,2\text{ м}^3$ .

**Пример 8.** Определить сколько (кг) нужно взять растворов соляной кислоты с концентрациями 34 и 10 масс. %, чтобы получить 100 кг 25%-ной соляной кислоты?

Решение. Пусть раствора  $HCl$  с концентрацией 34% нужно взять  $x$  кг, а с концентрацией 10% -  $y$  кг.

Составим уравнение, исходя из баланса  $HCl$  в исходных и приготовленном растворах:

$$0,34x + 0,1y = 0,25 \cdot 100,$$

второе уравнение составим исходя из баланса масс исходных и приготовленного растворов:

$$x + y = 100$$

Решая систему уравнений получим  $x=62,5\text{ кг}$ ,  $y=37,5\text{ кг}$ .

Ответ: 62,5 кг; 37,5 кг.

*Решить дополнительно*

**3.1.** Определить сколько (кг) нужно взять растворов серной кислоты с концентрациями 92 и 48 масс. %, чтобы получить 1000 кг 83% -ной серной кислоты? (795,5 кг, 204,5 кг).

**3.2.** В наличии имеется азотная кислота с концентрацией 58%. Сколько нужно взять воды, чтобы получить 2000 кг азотной кислоты с концентрацией 46%? (413,8 кг).

**3.3.** Серную кислоту с концентрацией 92,5% нужно разбавить водой до концентрации 38%. Сколько нужно взять воды, чтобы получить 180 кг разбавленной кислоты? (106,1 кг).

**3.4.** Определить сколько (кг) нужно взять растворов соляной кислоты с концентрациями 34 и 10 масс.%, чтобы получить 100 кг 25%-ной соляной кислоты? (62,5 кг; 37,5 кг).

**3.5.** При хранении на складе влажность ... кг каменного угля изменилась (увеличилась или уменьшилась). Определить конечную массу угля.

| Исходные данные          | Вариант |     |      |     |     |
|--------------------------|---------|-----|------|-----|-----|
|                          | 1       | 2   | 3    | 4   | 5   |
| Начальная масса угля, кг | 150     | 150 | 1000 | 500 | 200 |
| Начальная влажность, %   | 0,2     | 8,4 | 5,0  | 0,8 | 1,5 |
| Конечная влажность, %    | 4,0     | 3,9 | 3,5  | 2,0 | 4,5 |

#### 4. СТЕХИОМЕТРИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

**Стехиометрия** – количественные соотношения между вступающими в реакцию и образующимися в ее результате веществами.

Например, для реакции



можно записать следующие стехиометрические соотношения:

$$\frac{n(A)}{a} = \frac{n(B)}{b} = \frac{n(R)}{r} = \frac{n(L)}{l} \quad (27)$$

где  $a, b, r, l$  – стехиометрические коэффициенты в уравнении реакции.

В химической технологии с помощью стехиометрических расчетов определяют теоретические количества основных и вспомогательных веществ, необходимые для получения заданного количества продукта. В реальных условиях осуществления процесса теоретические количества веществ корректируют с учетом величины степени превращения реагентов  $x$  (см. уравнение 3), которая является мерой полноты протекания реакции.

Например, количество реагента А в реагирующей смеси можно выразить через степень его превращения  $x_A$  следующим образом

$$n_A = n_{A0} - x_A n_{A0} = n_{A0}(1 - x_A), \quad (28)$$

а количество вещества В через  $x_A$  с учетом стехиометрии реакции

$$n_B = n_{B0} - x_A n_{A0} \frac{b}{a}, \quad (29)$$

где  $n_{A0}$  и  $n_{B0}$  -начальные количества веществ А и В соответственно.

В стехиометрических соединениях химические элементы также присутствуют в строго определенных соотношениях, т.е химическая формула такого соединения определяет его молярный состав. Например, из формулы сульфата алюминия следует, что 1 моль  $Al_2(SO_4)_3$  содержит 2 моль атомов алюминия, 3 моль атомов серы, 12 моль атомов кислорода.

**Пример 9.** Рассчитайте молярную и массовую долю марганца в оксиде марганца (VII).

Решение. 1 моль  $Mn_2O_7$  содержит 2 моль атомов марганца и 7 моль атомов кислорода. Следовательно молярная доля марганца в оксиде будет  $2:9=0,222$ .

Молярные массы веществ равны, г/моль:  $M(Mn) = 55$ ,  $M(O) = 16$ ,  $M(Mn_2O_7)=222$ .

Массовая доля марганца в оксиде марганца(VII) равна:

$$\omega_{Mn} = \frac{m_{Mn}}{m_{оксида}} = \frac{2M_{Mn}}{M_{Mn_2O_7}} = \frac{2 \cdot 55}{222} = 0,495$$

**Ответ:** 0,222; 0,495.

**Пример 10.** Апатито-нефелиновая руда содержит, масс. %:  $P_2O_5$  - 21,35 и  $Al_2O_3$  -7,56. Определить содержание в руде апатита  $3Ca_3(PO_4)_2 \cdot CaCl_2 \cdot 2CaF_2$  и нефелина  $Na_2O \cdot K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$ , если весь  $P_2O_5$  связан в форме апатита, а  $Al_2O_3$  - в форме нефелина.

Решение. Молярные массы веществ, г/моль:  $M_{P_2O_5}=142$ ,  $M_{Al_2O_3}=102$ ,  $M_{ап}=1197$ ,  $M_{неф}=498$ .

Составим пропорции:

1 моль апатита - 3 моль  $P_2O_5$   
или 1197 г - 3·142 г  
х - 21,35 масс.%; откуда  $x=60,0\%$ .

1 моль нефелина - 1 моль  $Al_2O_3$   
 или 498 г - 102 г  
 $x$  - 7,56 масс.%; откуда  $x=36,9\%$ .

Ответ: апатита 60,0%, нефелина 36,9%.

**Пример 11.** В газовой системе протекает реакция пиролиза ацетона с получением кетена  $(CH_3)_2CO = CH_2CO + CH_4$ .

Определить степень превращения ацетона ( $x_{ac}$ ) и молярную долю кетена, если содержание ацетона в смеси в конце процесса составило 0,05 молярной доли.

Решение. Пусть начальное количество ацетона в системе было 1 моль, а в результате реакции его прореагировало  $y$  моль. Согласно стехиометрии реакции, в системе образовалось по  $y$  моль кетена и метана. Составим следующую таблицу:

| Вещество | Начальное количество, моль | Прореагировало (образовалось), моль | Конечное количество, моль | Конечное содержание, мол. доли |
|----------|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Ацетон   | 1                          | $y$                                 | $1-y$                     | 0,05                           |
| Кетен    | 0                          | $y$                                 | $y$                       | ?                              |
| Метан    | 0                          | $y$                                 | $y$                       | ?                              |
| Всего    | 1                          |                                     | $1+y$                     | 1                              |

Конечное содержание кетена и метана в конце процесса суммарно составит

$$1 - 0,05 = 0,95 \text{ мол.доли.}$$

Поскольку их количества одинаковы, то содержание также будет одинаково

$$0,95 : 2 = 0,475 \text{ мол.доли.}$$

Составим уравнение для молярной доли ацетона в конце процесса

$$\frac{1-y}{1+y} = 0,05.$$

Откуда  $y=0,905$  моль.

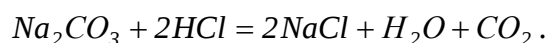
Степень превращения ацетона составит  $x_{ac} = \frac{0,905}{1} = 0,905$ .

Ответ:  $x_{\text{ак}}=0,905$ ;  $C_{\text{кет}}=0,475$  мол. доли.

Если в химической реакции один или несколько реагентов взяты в избытке, то после завершения реакции часть таких реагентов остается неизрасходованной. Реагент, полностью расходуемый в реакции, называется *лимитирующим*. Количество образующихся продуктов определяется по израсходованному количеству лимитирующего реагента.

**Пример 12.** Определить объем  $\text{CO}_2$  и массы веществ, оставшихся и образовавшихся в результате реакции взаимодействия 70 г  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и 40,5 г  $\text{HCl}$  при давлении 730 мм рт.ст. и температуре  $10^\circ\text{C}$ .

Решение. Уравнение реакции



1) Определим исходное количество моль реагентов

$$n(\text{Na}_2\text{CO}_3) = m / M = 70 / 106 = 0,66$$

$$n(\text{HCl}) = m / M = 40,5 / 36,5 = 1,10.$$

2) В соответствии со стехиометрией реакции в избытке находится  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Расчет ведем по лимитирующему агенту -  $\text{HCl}$ , который прореагирует полностью, т.е. 1,1 моль. Следовательно,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  прореагирует в 2 раза меньше, т.е. 0,55 моль.

После реакции в системе останется  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

$$0,66 - 0,55 = 0,11 \text{ моль или } 0,11 \cdot 106 = 11,66 \text{ г.}$$

3) Образовалось  $\text{NaCl}$  столько же, сколько прореагировало  $\text{HCl}$ , т.е. 1,1 моль или  $1,1 \cdot 58,5 = 64,35$  г.

4) Образовалось  $\text{H}_2\text{O}$  столько же, сколько прореагировало  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , т.е. 0,55 моль или  $0,55 \cdot 18 = 9,9$  г.

5) Образовалось  $\text{CO}_2$  столько же, сколько прореагировало  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , т.е. 0,55 моль.

6) Определим объем  $\text{CO}_2$  при давлении 730 мм рт.ст. и температуре  $10^\circ\text{C}$  из уравнения Менделеева-Клапейрона

$$V = \frac{n \cdot R \cdot T}{P} = \frac{0,55 \cdot 8,314 \cdot (10 + 273)}{730 \cdot 133,3} = 0,0133 \text{ м}^3 = 13,3 \text{ дм}^3.$$

Ответ: объем  $\text{CO}_2=13,3 \text{ дм}^3$ , массы, г:  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  -11,66,  $\text{NaCl}$  -64,35,  $\text{H}_2\text{O}$  - 9,9.

*Решить дополнительно*

**4.1.** В газовой системе протекает реакция  $A + 2B = 2R + S$ .

Начальные концентрации реагентов составляют, моль/дм<sup>3</sup>:  $C_{A0}=1$ ,  $C_{B0}=1,5$ . Определить степень превращения вещества В ( $x_B$ ) и состав смеси после реакции, если степень превращения вещества А  $x_A=0,6$ .

( $C_A=0,4$ ,  $C_B=0,3$ ,  $C_R=1,2$ ,  $C_S=0,6$ ).

**4.2.** Реакция гидрирования бензола  $C_6H_6 + 3H_2 = C_6H_{12}$

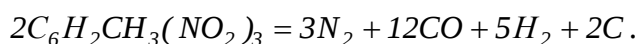
проводится при мольном соотношении реагентов  $C_6H_6:H_2=1:10$ . Степень превращения бензола 0,95. Начальное количество бензола 10 моль. Рассчитать мольный состав смеси после реакции.

( $N_{C_6H_6}=0,5$ ,  $N_{H_2}=71,5$ ,  $N_{C_6H_{12}}=9,5$  моль)

**4.3.** Железо массой 5,6 кг сожгли в 5,6 м<sup>3</sup> хлора (н.у.). Определите массу образовавшегося хлорида железа (III) и оставшихся реагентов, если степень превращения железа составила 98%.

( $\text{FeCl}_3$  -15,92 кг, Fe - 0,112 кг,  $\text{Cl}_2$  - 7,31 кг).

**4.4.** Сосуд емкостью 0,5 дм<sup>3</sup> выдерживает максимальное давление 50 МПа. Какая минимальная масса тротила может разорвать сосуд, если разложение тротила при взрыве (температура взрыва 2000 °С) идет по реакции



(32 г).

**4.5.** В сосуде емкостью 11, 45 дм<sup>3</sup> находилось 17,2 г  $\text{N}_2\text{O}_4$ . Рассчитать состав газовой смеси (об.%), получившейся в результате реакции  $\text{N}_2\text{O}_4 \leftrightarrow 2\text{NO}_2$  при температуре 100 °С и давлении 96 кПа и степень диссоциации  $\text{N}_2\text{O}_4$ .

(0,9; 5,35 %  $\text{N}_2\text{O}_4$ , 94,65 %  $\text{NO}_2$ ).

Примеры расчетов с использованием стехиометрических соотношений, в том числе, расчеты материальных и тепловых балансов, приводятся в [5,6, 10-14].

## 5. ТОПЛИВО. ЕГО ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА

**Топливо** - существующие в природе или искусственно полученные вещества, являющиеся источником тепловой энергии и сырьем для химической промышленности. По определению Д.И. Менделеева «Топливом называется горючее вещество, умышленно сжигаемое для получения тепла».

Основные требования, предъявляемые к топливу:

- достаточность природных запасов (или сырья для получения) и доступность для добычи;
- газообразное состояние продуктов сгорания для более гибкого использования тепла и управления процессом;
- легкость удаления продуктов сгорания из зоны горения;
- относительная безвредность продуктов сгорания для обслуживающего персонала, аппаратуры и окружающей среды;
- низкая стоимость и транспортабельность.

Всем этим требованиям удовлетворяют лишь два химических элемента: углерод (С) и водород (Н), а также их химические соединения, которые, как правило, имеют органическое происхождение и являются основой любого топлива.

**Химическое топливо** выделяет энергию в результате окисления горючих элементов, входящих в его состав.

Основными видами химического топлива являются органические топлива: торф, горючие сланцы, угли, природный газ, продукты переработки нефти.

Химическое топливо является важнейшим источником энергии составляющим в балансе энергоресурсов химической промышленности до 70%. Структура потребления химического топлива представлена на диаграмме (рис.3).

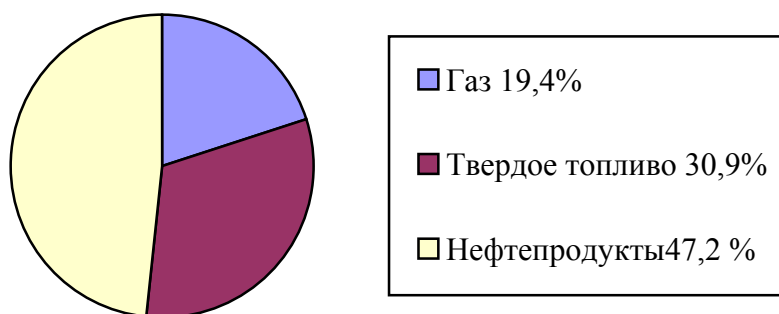


Рис. 3. Структура потребления химического топлива

Все топлива обычно классифицируют в зависимости от агрегатного состояния (твердое, жидкое, газообразное) и способа получения (естественное

или природное топливо, искусственное топливо и топливные отходы) (табл.5). *Естественное* (природное) топливо - топливо, используемое без переработки. *Искусственное* - топливо, полученное при переработке естественного топлива. В процессе переработки естественного топлива в искусственное получают *топливные отходы*.

Свойства топлива зависят, главным образом, от его химического состава. Основным элементом любого топлива природного происхождения является углерод. В элементарный состав топлива также входят Н, О, N, S, зола, влага (рис. 4).

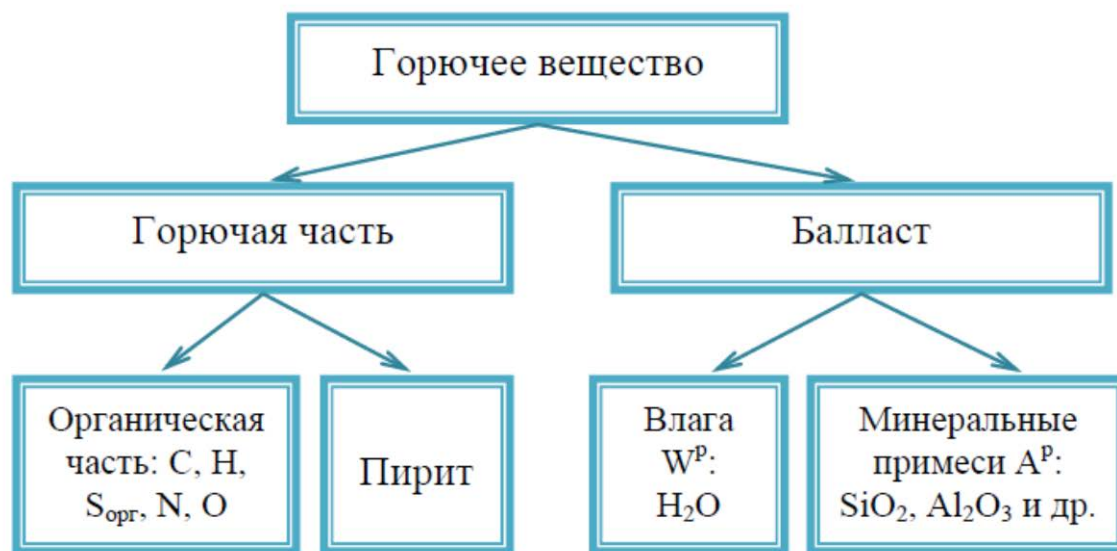


Рис. 4. Состав горючего вещества в твердом и жидком состоянии

## Классификация промышленного топлива

| Происхождение               | Физическое состояние                                                                                     |                                                                                                                     |                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                             | твердое                                                                                                  | жидкое                                                                                                              | газообразное                                                                                                                                                         |
| <b>Естественное</b>         | Дрова,<br>торф,<br>бурые угли,<br>каменные угли,<br>антрациты,<br>полуантрациты,<br>горючие сланцы       | Нефть                                                                                                               | Природный,<br>попутный и<br>нефтепромысловый<br>газ                                                                                                                  |
| <b>Искусственное</b>        | Древесный уголь,<br>кокс,<br>топливные<br>брикеты,<br>пылевидное<br>топливо                              | Бензин,<br>мазут,<br>дизельное<br>топливо,<br>керосин,<br>соляровое масло,<br>смола,<br>гудрон,<br>бензол,<br>спирт | Газы: сжиженный,<br>нефтезаводской,<br>коксовый,<br>светильный,<br>полукоксовый,<br>доменный,<br>воздушный,<br>смешанный<br>генераторный,<br>водяной,<br>полуводяной |
| <b>Топливные<br/>отходы</b> | Отходы<br>углеобогащения,<br>кокс газовых<br>заводов,<br>металлургический<br>коксик,<br>древесные отходы | Мазут,<br>кислый гудрон                                                                                             | Доменный газ,<br>коксовый газ,<br>газы<br>нефтепереработки                                                                                                           |

В табл. 6 представлен элементный состав органической (горючей) массы некоторых топлив.

Таблица 6

Элементный состав органической (горючей) массы некоторых топлив,  
(%)

| Вид топлива                         | Углерод | Водород | Кислород | Азот    |
|-------------------------------------|---------|---------|----------|---------|
| Древесина                           | 51      | 5-6     | 40-44    | 0,5-1,5 |
| Торф                                | 55-60   | 5-6     | 33-38    | 0,5-1,5 |
| Бурый уголь                         | 64-77   | 4-6     | 15-25    | 1       |
| Каменный уголь<br>(длиннопламенный) | 75-80   | 5-6     | 10-16    | 1-1,5   |
| Антрацит                            | 90-93   | 2-4     | 2-4      | 1       |
| Нефть, бензин,<br>керосин           | 84-87   | 13-14   | 1-2      |         |
| Мазут                               | 86-88   | 10-10,5 | 0,5-0,8  |         |

Твердые топлива по стадии углефикации можно выстроить в ряд:

*древесина → торф → бурый уголь → каменный уголь → антрацит.*

Этот ряд характеризуется увеличением содержания углерода и уменьшением содержания кислорода в органической части. Содержание водорода и, особенно, азота почти не изменяется.

Далее приведем краткую характеристику элементного состава топлива.

### Углерод

Углерод является основным горючим элементом топлива. С увеличением геологического возраста твердого топлива содержание в нем углерода повышается. Состав жидких нефтяных топлив является достаточно стабильным и содержание в них углерода на горючую массу колеблется в узких пределах 84-87 %.

Углерод характеризуется высоким удельным тепловыделением: при полном сгорании 1 кг углерода выделяется 33600 кДж теплоты. Следовательно, углерод по существу определяет тепловую ценность топлива.

## *Водород*

Водород является вторым важнейшим горючим элементом топлива. В жидких нефтяных топливах содержание водорода значительно выше, чем в твердых топливах. Тепловая ценность водорода почти в четыре раза выше тепловой ценности углерода: при полном сгорании 1 кг водорода и конденсации продуктов сгорания выделяется 141500 кДж тепла, без учета конденсации водяных паров - 119000 кДж.

## *Сера*

Сера является весьма нежелательным, горючим элементом топлива. В общем случае сера топлива состоит из серы органической ( $S_{орг}$ ), входящей в топливо в виде органических соединений, серы колчеданной ( $S_K$ ), входящей в состав топлива в виде колчедана ( $FeS_2$ ), и серы сульфатной ( $S_c$ ), входящей в топливо в виде, например, гипса ( $CaSO_4$ ).

Сера органическая и колчеданная образуют серу горючую (летучую)

$$S_{л} = S_{орг} + S_K.$$

Сульфатная сера не горит и в элементарном составе топлива включается в золу. Содержание серы в топливах колеблется от 0 до нескольких %. При полном сгорании 1 кг серы летучей выделяется 9000 кДж тепла.

## *Кислород и азот*

Кислород и азот также являются нежелательными элементами топлива (балластом). Наличие их в топливе снижает содержание горючих элементов. Кислород, кроме того, связывает часть горючих элементов топлива и обесценивает его. Содержание кислорода с увеличением геологического возраста топлива снижается (см. табл.6).

Азот в топливе способствует образованию в газообразных продуктах сгорания окислов азота, обладающих высокой токсичностью, значительно превышающей токсичность окислов серы.

## *Минеральные примеси и зола*

Основными минеральными примесями являются силикаты, сульфиды, карбонаты, сульфаты, оксиды металлов, фосфаты, хлориды, соли щелочных металлов.

В зависимости от происхождения минеральные примеси принято делить на три вида. *Первичные примеси* попали в топливо из углеобразователей и связаны с органической массой топлива. Этих примесей в топливе немного, они равномерно распределены в топливе и не могут быть из него удалены.

*Вторичные примеси* внесены в топливо ветром и водой в процессе его образования. Они распределены в топливе менее равномерно, но также не могут быть из него удалены. Поэтому первичные и вторичные примеси являются внутренними примесями топлива.

*Третичные примеси* - примеси из минерального окружения пласта. Они распределены в топливе неравномерно и легко отделяются. Твердый негорючий остаток, получающийся после завершения преобразований в минеральной части топлива при выжигании его в лабораторных условиях, называется *золы*. Содержание золы в топливе обозначают символом *A*. Этот показатель определяется путем выжигания топлива в муфельной печи при температуре 800 °С в воздушной среде. Содержание золы обычно дается на сухую массу ( $A^d$ ). Зольность жидких топлив нормируется ГОСТами и по своему значению невелика. Например, для дизельного топлива не более 0,02%, для топочных мазутов не более 0,30 %. В твердых топливах содержание золы может достигать значительных величин (до 30 % и более на сухую массу).

### *Влага*

Влага также является балластом топлива. Наличие её (так же, как кислорода и азота) уменьшает содержание горючей части топлива. Это снижает тепловую ценность топлива, а также увеличивает расходы на его транспорт. Влага, кроме того, снижает полезное тепловыделение топлива, поскольку часть тепла при горении расходуется на превращение её в пар. Это ведёт также к понижению температуры в зоне горения и ухудшает условия теплообмена.

Содержание влаги в топливе обозначают *W*. Влагу топлива принято разделять на *внешнюю и внутреннюю*.

*Внешняя влага* состоит из поверхностной и капиллярной. Поверхностная влага попадает в топливо при добыче, транспортировке и хранении. Чем мельче топливо, тем больше на нем поверхностной влаги. Капиллярная влага – это влага, заполняющая поры топлива. Чем старше топливо, тем меньше в нем пор, а значит, и капиллярной влаги. Внешняя влага может быть удалена из топлива тепловой сушкой и механическими средствами.

*Внутренняя влага* состоит из коллоидной и гидратной. Коллоидная влага физико-химически связана с органической массой топлива и распределяется в нем довольно равномерно. Количество коллоидной влаги падает с увеличением возраста топлива. Максимальное количество коллоидной влаги содержится в торфе, минимальное – в антраците. Содержание гидратной влаги, входящей в состав молекул некоторых минеральных примесей, невелико. При сушке в

обычной атмосфере испаряется часть коллоидной влаги, а количество гидратной влаги остается практически неизменным. Твердое топливо с установившейся в естественных условиях влажностью называют *воздушно-сухим*. Удаление гидратной влаги происходит только при высоких температурах.

\*\*\*

Использование твердого топлива для получения теплоты, т.е. в качестве энергетического топлива, связано с проблемой загрязнения окружающей среды продуктами его переработки ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , оксиды азота и др.). Поэтому в настоящее время разрабатываются и внедряются технологии переработки твердого топлива с получением синтетических газообразных и жидких топлив, технологии комплексной переработки с получением разнообразных химических продуктов [15-17].

Активно развивается подотрасль химической промышленности - **углехимия**, охватывающая производство органических и неорганических продуктов с использованием в качестве сырья твёрдых горючих ископаемых [18].

## 6. ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ

**Горение** – сложный физико-химический процесс, в основе которого лежит химическая реакция взаимодействия горючего вещества и окислителя, сопровождающаяся выделением большого количества тепла и обычно свечением. Окислителем в процессе горения может быть кислород, а также хлор, бром и другие вещества. Чаще всего приходится иметь дело с горением, где окислителем является кислород воздуха. Для возникновения процесса горения, кроме горючего вещества и окислителя, необходимо наличие достаточного по мощности источника зажигания.

Процессы горения в зависимости от скорости могут находиться в интервале от медленных до мгновенных. Примером *медленного* горения является самовозгорание твердого топлива при его хранении на складе. *Мгновенное* горение представляет собой взрыв.

**Горючее вещество** (газ, пар, твердый материал и т.д.) – это вещество, способное самостоятельно гореть после удаления источника зажигания.

Органические вещества (уголь, торф, нефть и др.) являются термически нестойкими и при повышении температуры начинают разлагаться с выходом *летучих веществ*. Под летучими веществами принято понимать смесь газообразных и парообразных продуктов, образующихся при нагревании без доступа воздуха. Выход летучих веществ обозначают символом *V*.

В состав летучих веществ входят горючие ( $\text{H}_2$ , углеводороды,  $\text{CO}$  и др.) и негорючие ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и др.) газы.

Выход летучих веществ является важной характеристикой угля, как промышленного сырья, по которой может быть оценена термическая стойкость структур, составляющих органическую часть углей.

Оставшееся после термического разложения твердое вещество называется *коксовым остатком*.

### 6.1. Расчет теплоты сгорания топлива

Главным показателем энергетической ценности топлива является **теплота его сгорания (теплотворная способность)**.

*Теплота сгорания топлива* - количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании 1 кг твердого (или жидкого) топлива или 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива при нормальных условиях (н.у). Значения стандартных теплот сгорания веществ приводятся в справочных таблицах, например [19].

Теплоту сгорания веществ подразделяют на высшую и низшую.

**Низшая теплота сгорания вещества**  $Q_n$  – выделившаяся при горении тепловая энергия, когда в продуктах сгорания  $H_2O$  находится в виде пара.

**Высшая теплота сгорания вещества**  $Q_g$  – теплота, включающая в себя теплоту конденсации водяного пара  $Q_{H_2O}$ , входящего в состав продуктов сгорания, т. е. в продуктах сгорания  $H_2O$  находится в виде влаги. Теплота конденсации водяного пара при расчетах обычно принимается:  $Q_{H_2O} = 2514$  кДж/кг.

Низшая и высшая теплота сгорания связаны между собой соотношением

$$Q_n = Q_g - Q_{H_2O} \quad (30)$$

При сжигании 1 кг органического вещества теплота конденсации водяного пара, кДж/кг, может быть определена по формуле:

$$Q_{H_2O} = 25([W] + 9[H]) \quad (31)$$

где  $[W]$  и  $[H]$  – процентное содержание влаги и водорода в веществе (масс. %), соответственно.

25 – это энтальпия 1 кг паров при давлении  $p = 0,1$  МПа, исчисленная на 1 % состава топлива.

Часто величина  $Q_n$  (МДж/кг) для **твердых и жидких** топлив приближенно определяется по формуле Менделеева:

$$Q_H = 0,339[C] + 1,025[H] + 0,1085[S] - 0,1085[O] - 0,025[W] \quad (32)$$

где в скобках указано процентное (масс. %) содержание соответствующих элементов в составе топлива.

В этой формуле учитывается теплота экзотермических реакций горения углерода, водорода и серы (со знаком «плюс»). Кислород, входящий в состав топлива, частично замещает кислород воздуха, поэтому соответствующий член в формуле (32) берется со знаком «минус». При испарении влаги теплота расходуется, поэтому соответствующий член, содержащий W, берется также со знаком «минус».

Азот N и зола A в формулу не входят, поскольку являются инертными веществами и не участвуют в реакции горения.

Низшая теплотворная способность  $Q_H$  (МДж/м<sup>3</sup>) сухих **горючих газов** с достаточной точностью может быть рассчитана как сумма произведений энтальпий окисления горючих составляющих и их процентного содержания в 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива:

$$Q_H = 0,108[H_2] + 0,126[CO] + 0,358[CH_4] + 0,560[C_2H_2] + 0,234[H_2S] + 0,638[C_2H_6] + 0,913[C_3H_8] + 1,187[C_4H_{10}] + 0,146[C_5H_{12}] \quad (33)$$

где в скобках указано процентное (об. %) содержание соответствующих газов в составе смеси.

Высшая теплота сгорания используется для сравнения тепловой ценности отдельных топлив, низшая – во всех технических расчетах.

С теорией и принципами расчета процессов горения можно ознакомиться в пособиях [20-23].

**Пример 13.** Вычислить низшую теплоту сгорания сульфадимезина C<sub>12</sub>H<sub>14</sub>O<sub>2</sub>N<sub>4</sub>S.

Решение: расчет выполним по формуле Д.И. Менделеева.

1) Рассчитаем процентный состав каждого элемента в веществе.

Молярная масса сульфадимезина C<sub>12</sub>H<sub>14</sub>O<sub>2</sub>N<sub>4</sub>S M=278 г/моль.

$$[C] = (12 \cdot 12 / 278) \cdot 100 = 51,8 \%$$

$$[H] = (1 \cdot 14 / 278) \cdot 100 = 5,0 \%$$

$$[O] = (16 \cdot 2 / 278) \cdot 100 = 11,5 \%$$

$$[N] = (14 \cdot 4 / 278) \cdot 100 = 20,2 \%$$

$$[S] = (32 / 278) \cdot 100 = 11,5 \%$$

2) Подставим найденные значения в формулу Д.И. Менделеева

$$Q_H = 0,339[C] + 1,025[H] + 0,1085[S] - 0,1085[O] = \\ = 0,339 \cdot 51,8 + 1,025 \cdot 5 + 0,1085 \cdot 11,5 - 0,1085 \cdot 11,5 = 22,7 \text{ МДж / кг.}$$

Ответ: 22,7МДж/кг.

**Пример 14.** Определить теплотворную способность ( $Q_H$ ) угля, элементный состав которого следующий

| Элемент             | C    | H   | S   | N   | O  | W  | A   |
|---------------------|------|-----|-----|-----|----|----|-----|
| Содержание, масс. % | 37,2 | 2,6 | 0,6 | 0,4 | 12 | 40 | 7,2 |

Решение. Подставим приведенные в таблице данные в формулу Менделеева:

$$Q_H = 0,339[C] + 1,025[H] + 0,1085[S] - 0,1085[O] = \\ = 0,339 \cdot 37,2 + 1,025 \cdot 2,6 + 0,1085 \cdot 0,6 - 0,1085 \cdot 12 = 13,0 \text{ МДж / кг.}$$

Ответ: 13 МДж/кг.

**Пример 15.** Определить теплоту сгорания смеси газов состава ф, об. %:  $H_2$ -87;  $CH_4$ -2,5;  $C_2H_2$ -0,5;  $CO_2$ -10.

Решение. Низшую теплоту сгорания  $1\text{ м}^3$  смеси газов данного состава рассчитаем по формуле

$$Q_H(см) = 0,108[H_2] + 0,358[CH_4] + 0,560[C_2H_2] = \\ = 0,108 \cdot 87 + 0,358 \cdot 2,5 + 0,560 \cdot 0,5 = 10,571 \text{ МДж / м}^3.$$

Ответ: 10,571 МДж/кг.

## 6.2. Расчет количества воздуха, необходимого для горения

Для эффективной работы теплоэнергетических установок необходимо обеспечить такую скорость реакции горения, при которой будет происходить устойчивое горение, т.е. необходимо поддерживать определенное концентрационное соотношение между топливом и окислителем. При нарушении этого соотношения будут снижаться скорость реакции и тепловыделение.

В большинстве случаев окисление (горение) горючих веществ происходит кислородом воздуха. Теоретическое количество кислорода на горение рассчитывается по реакциям горения. Затем делается пересчет кислорода на воздух с учетом состава последнего. В состав атмосферного воздуха кроме

основных компонентов – кислорода  $O_2$  и азота  $N_2$ , входят инертные газы (аргон, неон, гелий, криптон, ксенон), озон  $O_3$ , углекислый газ  $CO_2$ , пары воды  $H_2O$  и частицы аэрозолей (пыль). Однако объем второстепенных компонентов в сухом очищенном воздухе не превышает 1%. Поэтому для расчетов принимают, что воздух состоит из двух компонентов – кислорода и азота (табл.7). Азот воздуха не участвует в горении и является инертным веществом, так же как и входящие в состав воздуха инертные газы.

Таблица 7

Характеристики воздуха при нормальных физических условиях

| Газ                              | Состав                   |                          | М,<br>кг/кмоль | ρ,<br>кг/м <sup>3</sup> |
|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|-------------------------|
|                                  | масс. %                  | об. %                    |                |                         |
| <b>Кислород <math>O_2</math></b> | 100                      | 100                      | 32,00          | 1,429                   |
| <b>Азот <math>N_2</math></b>     | 100                      | 100                      | 28,013         | 1,251                   |
| <b>Воздух</b>                    | $O_2$ - 23<br>$N_2$ - 77 | $O_2$ - 21<br>$N_2$ - 79 | 28,96          | 1,293                   |

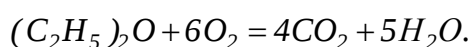
Исходя из объемного соотношения (см. табл.7), в 1 м<sup>3</sup> воздуха содержится 0,21 м<sup>3</sup> кислорода, следовательно, на 1 м<sup>3</sup> кислорода приходится  $V_g = 1/0,21 = 4,762$  м<sup>3</sup> воздуха. Соответственно, на 1 кг кислорода приходится  $m_g = 1/0,23 = 4,348$  кг воздуха, что соответствует массовому содержанию кислорода в воздухе  $\omega_{O_2} = 1/4,348 = 0,23$ .

Аналогичным образом, самостоятельно определите массовое содержание азота в воздухе.

*Расчет теоретического объема воздуха, необходимого для горения индивидуального вещества*

**Пример 16.** Рассчитать теоретический объем воздуха необходимый для полного сгорания 1 кг диэтилового эфира  $C_2H_5OC_2H_5$  при температуре 10 °С и давлении 1,2 ат.

Решение. Теоретический объем кислорода, необходимый для горения рассчитаем по уравнению реакции горения:



Молярная масса  $C_2H_5OC_2H_5 = 74$  кг/кмоль.

В соответствии со стехиометрией реакции

$$\begin{array}{lcl} & 1 \text{ кмоль } \text{C}_2\text{H}_5\text{OC}_2\text{H}_5 & - 6 \text{ кмоль } \text{O}_2 \\ \text{или} & 74 \text{ кг} & - 6 \cdot 22,4 \text{ м}^3, \\ \text{тогда} & 1 \text{ кг} & - x \text{ м}^3 \\ & & x=1,81 \text{ м}^3 \text{ O}_2 (\text{н.у.}). \end{array}$$

Определим, какой объем будет занимать кислород при заданных условиях, используя объединенный газовый закон.

$$V = \frac{p_0 \cdot V_0 \cdot T}{T_0 \cdot P} = \frac{1 \cdot 1,81 \cdot (10 + 273)}{273 \cdot 1,2} = 1,56 \text{ м}^3$$

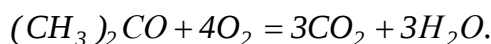
Рассчитаем теоретический объем воздуха с учетом содержания в нем кислорода 21 об. %:

$$V_{\text{возд}} = 1,56 : 0,21 = 7,4 \text{ м}^3$$

Ответ: 7,4 м<sup>3</sup>.

**Пример 17.** Рассчитать объем воздуха необходимый для полного сгорания 10 кг ацетона  $(\text{CH}_3)_2\text{CO}$  при температуре 23 °С и давлении 95 кПа, если горение протекает с коэффициентом избытка воздуха 1,2?

Решение. Теоретический объем кислорода, необходимый для горения рассчитаем по уравнению реакции горения:



Молярная масса  $(\text{CH}_3)_2\text{CO} = 58 \text{ кг/кмоль}$ .

В соответствии со стехиометрией реакции

$$\begin{array}{lcl} & 1 \text{ кмоль } (\text{CH}_3)_2\text{CO} & - 4 \text{ кмоль } \text{O}_2 \\ \text{или} & 58 \text{ кг} & - 4 \cdot 22,4 \text{ м}^3, \\ \text{тогда} & 10 \text{ кг} & - x \text{ м}^3 \\ & & x=15,45 \text{ м}^3 \text{ O}_2 (\text{н.у.}). \end{array}$$

Определим, какой объем будет занимать кислород при заданных условиях, используя объединенный газовый закон.

$$V = \frac{p_0 \cdot V_0 \cdot T}{T_0 \cdot P} = \frac{1 \cdot 15,45 \cdot (23 + 273)}{273 \cdot 0,938} = 17,86 \text{ м}^3$$

95 кПа = 0,938 ат.

Рассчитаем теоретический объем воздуха с учетом содержания в нем кислорода 21 об. %:

$$V_{\text{возд}}^{\text{т}} = 17,86 : 0,21 = 85,0 \text{ м}^3$$

С учетом коэффициента избытка воздуха 1,2, практический объем воздуха составит

$$V_{\text{возд}}^{\text{пр}} = 85 \cdot 1,2 = 102,0 \text{ м}^3$$

Ответ: 102 м<sup>3</sup>.

*Решить дополнительно*

**6.1.** У фурм доменной печи сгорает 50000 кг угля в час (содержание углерода в угле 80%). Рассчитать теоретическое количество сухого воздуха (м<sup>3</sup>/мин), необходимое для горения угля, если весь углерод сгорает до СО. (2963 м<sup>3</sup>/мин).

*Расчет теоретического и практического объема воздуха, необходимого для горения смеси газов*

Технические горючие газы (природный, светильный, водяной, генераторный, колошниковый и др.) могут содержать окись углерода СО, метан СН<sub>4</sub>, водород Н<sub>2</sub>, сероводород Н<sub>2</sub>С, азот N<sub>2</sub>, кислород О<sub>2</sub> и другие компоненты. Исходными данными для расчета являются процентный состав газа (об. %), температура *T* и давление *p* воздуха.

Общий алгоритм расчета следующий: из стехиометрии реакций определяют объем кислорода, необходимый для полного сгорания каждого компонента, затем суммарный объем кислорода. После этого делают пересчет на объем воздуха, принимая содержание в нем кислорода 21 об. %. С учетом вышесказанного, формула для расчета теоретического объема воздуха для сгорания газовой смеси будет иметь следующий вид:

$$V_{\text{г}}^{\text{теор}} = \frac{\beta_1 \cdot \varphi_1 + \beta_2 \cdot \varphi_2 + \beta_3 \cdot \varphi_3 + \dots - \varphi(\text{O}_2)}{21} \cdot V_{\text{см}}. \quad (34)$$

где  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  - стехиометрические коэффициенты при воздухе (кислороде) в уравнении реакции на 1 моль каждого горючего компоненте газовой смеси,

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  - содержание горючих компонентов в смеси, об. %,

$\varphi(\text{O}_2)$  - содержание кислорода в газовой смеси, об. %,

$V_{\text{см}}$  - объем газовой смеси,  $\text{м}^3$ .

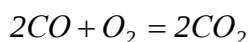
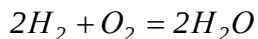
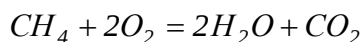
Практически при горении реальный расход воздуха значительно больше, чем теоретический. Отношение реального расхода воздуха к теоретически необходимому называется **коэффициентом избытка воздуха ( $\alpha$ )**. В различных технических аппаратах процесс горения идет с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha=1,1\div 1,5$ , при пожарах эта величина существенно больше. С учетом избытка воздуха, практический объем воздуха рассчитывают по формуле

$$V_{\text{г}}^{\text{пр}} = V_{\text{г}}^{\text{теор}} \cdot \alpha. \quad (35)$$

**Пример 18.** Рассчитать теоретически необходимый объем воздуха при температуре  $15^\circ\text{C}$  и давлении 760 мм рт.ст для полного сгорания  $1 \text{ м}^3$  колошникового газа, следующего состава:

| Компоненты        | $\text{CO}_2$ | $\text{CO}$ | $\text{CH}_4$ | $\text{H}_2$ | $\text{N}_2$ | $\text{O}_2$ |
|-------------------|---------------|-------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| Содержание, об. % | 12            | 25          | 1             | 2            | 60           | 1            |

Решение. Составим уравнения реакций горения компонентов газа



Поскольку азот  $\text{N}_2$  не участвует в процессе горения, а углекислый газ является продуктом полного горения, то для них уравнения химических реакций не составляем.

Определим содержание ( $\text{м}^3$ ) горючих компонентов и кислорода в  $1 \text{ м}^3$  колошникового газа

| Компоненты        | $\text{CH}_4$ | $\text{H}_2$ | $\text{CO}$ | $\text{O}_2$ |
|-------------------|---------------|--------------|-------------|--------------|
| Содержание, об. % | 1             | 2            | 25          | 1            |
| $V_i, \text{м}^3$ | 0,01          | 0,02         | 1,25        | 0,01         |

Из стехиометрии реакций определим объем кислорода, необходимый для полного сгорания каждого компонента

- для метана:  $0,01 \cdot 2 = 0,02 \text{ м}^3$

- для водорода:  $0,02 : 2 = 0,01 \text{ м}^3$

- для угарного газа:  $0,25 : 2 = 0,125 \text{ м}^3$

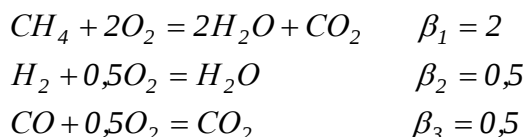
Суммарный объем кислорода с учетом кислорода, содержащегося в составе смеси, который частично замещает кислород воздуха при горении и берется со знаком «-», составит

$$V_{O_2} = 0,02 + 0,01 + 0,125 - 0,01 = 0,145 \text{ м}^3$$

Определим соответствующий объем воздуха, принимая содержание в нем кислорода 21 об.%

$$V_g = 0,145 \cdot 100 / 21 = 0,690 \text{ м}^3$$

Теоретически необходимый объем воздуха на горение также можно рассчитать по формуле (34). Для этого запишем уравнения реакций горения в расчете на 1 моль горючих компонентов газа и определим коэффициенты  $\beta$ :



$$V_g^{теор} = \frac{\beta_1 \cdot \varphi_1 + \beta_2 \cdot \varphi_2 + \beta_3 \cdot \varphi_3 + \dots - \varphi(O_2)}{21} \cdot V_{см} = \frac{2 \cdot 1 + 0,5 \cdot 2 + 0,5 \cdot 25 - 1}{21} \cdot 1 = 0,690 \text{ м}^3$$

Для определения объема воздуха при горении в заданных условиях ( $t=15^\circ\text{C}$ ,  $P=760 \text{ мм рт.ст.}$ ) воспользуемся уравнением Гей-Люссака:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}, \quad \frac{0,69}{273} = \frac{V_2}{(273 + 15)} \Rightarrow V_2 = 0,728 \text{ м}^3.$$

Ответ:  $0,728 \text{ м}^3$ .

*Решить дополнительно*

**6.2.** Определить объем воздуха, необходимого для полного сгорания  $10 \text{ м}^3$  доменного газа следующего состава (об.%): оксид углерода (II) CO – 27, водород  $H_2$  – 3, углекислый газ  $CO_2$  – 13, метан  $CH_4$  – 1, азот  $N_2$  – 56. Горение протекает с коэффициентом избытка воздуха 1,25.  
( $10,1 \text{ м}^3$ ).

**6.3.** Доменный газ состава (об.%): оксид углерода (II) CO – 28, водород H<sub>2</sub> – 3, CO<sub>2</sub> – 12, метан CH<sub>4</sub> – 0,6, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> – 0,2, азот N<sub>2</sub> – 56,2. Горение протекает с 20 % избытком воздуха. (10,1 м<sup>3</sup>). Рассчитать а) теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 м<sup>3</sup> доменного газа; б) состав продуктов горения.

(0,99 м<sup>3</sup>; об.%: CO<sub>2</sub> – 29,3, O<sub>2</sub> – 1,9, N<sub>2</sub> – 73, H<sub>2</sub>O – 2,5).

### 6.3. Пределы воспламенения газовых смесей

**Взрывоопасность топлива** – это возможность быстрого, почти мгновенного воспламенения и сгорания горючих веществ. Взрывоопасность определяется содержанием в топливе газовой составляющей.

Можно привести следующие общие закономерности взрывоопасности топлив:

- углеводородные топлива (природный газ, нефтепродукты) тем более взрывоопасны, чем больше атомов углерода находится в молекуле углеводорода;

- у твердых топлив взрывоопасность определяется содержанием горючих летучих в топливе (V). Считается, что при выходе летучих веществ на рабочую массу<sup>2</sup> (V<sup>\*</sup>) более 10% твердое топливо взрывоопасно.

В процессе производства, переработки или эксплуатации химических продуктов могут образовываться различные смеси горючих газов или пара с воздухом.

Горючая жидкость не горит. Но все горючие жидкости способны испаряться. Горение происходит только в паровой фазе, находящейся над поверхностью жидкости, где создается определенный слой паровоздушной смеси.

При определенных соотношениях и температурах (не ниже температуры воспламенения) смеси горючих газов или пара с воздухом могут воспламеняться или взрываться.

Различают **нижний и верхний концентрационные пределы взрываемости (воспламенения)** (C<sub>нкпр</sub>, C<sub>вкпр</sub>) — минимальное и максимальное процентное содержание газа в смеси с окислителем (воздухом), при которых может произойти воспламенение и взрыв. Интервал концентраций газов между нижним и верхним концентрационными пределами воспламенения называется *областью воспламенения* (рис. 5). Внутри этой области все смеси горючего газа с воздухом способны воспламеняться от внешнего источника

---

<sup>2</sup> **Рабочее состояние топлива** (верхний индекс «г» (p)) – состояние топлива с таким содержанием влаги и зольностью, с которыми оно добывается, отгружается или используется.

зажигания с последующим распространением горения на весь объем смеси. Различные смеси имеют различную область воспламенения. Наибольшую область воспламенения имеют водород, ацетилен и др., наименьшую – бензин, керосин, пропан, бутан и др. (табл. ПЗ Приложения). Чем ниже нижний концентрационный предел и шире область воспламенения газов, тем большую пожарную опасность представляют эти газы.

**Пример 19.** В цехе размерами 90х20х6 м<sup>3</sup> из-за разгерметизации оборудования испарилось 10 кг аммиака. Температура воздуха в цехе 20 °С, давление Р= 750 мм рт.ст. Рассчитать объемную концентрацию аммиака в воздухе и определить взрывоопасной ли получилась его смесь с воздухом, если считать, что пары аммиака равномерно распределились по всему свободному объему помещения? Значение коэффициента, учитывающего, что часть объема помещения занята оборудованием, принять равным 0,8. Пределы воспламенения газов в воздушной смеси указаны в табл. ПЗ Приложения.

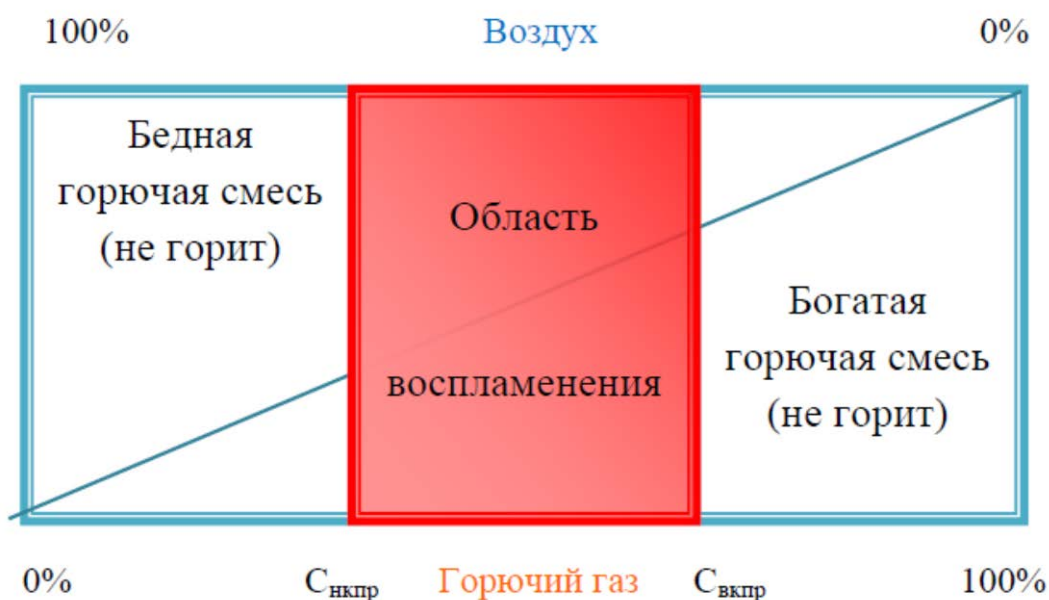


Рис. 5. Схема расположения концентрационных пределов воспламенения

Решение. Рассчитаем свободный объем цеха:

$$V = 0,8 \cdot 90 \cdot 20 \cdot 6 = 8640 \text{ м}^3.$$

По уравнению Менделеева-Клапейрона рассчитаем объем, который занял испарившийся аммиак

$$V_{ам} = \frac{m_{ам} \cdot R \cdot T}{M_{ам} \cdot P} = \frac{10 \cdot 1000 \cdot 8,31 \cdot (20 + 273)}{17 \cdot (750 \cdot 133,322)} = 14,32 \text{ м}^3.$$

Проверим правильность подставленных единиц измерения величин, входящих в формулу

$$[V_{ам}] = \frac{z \cdot Дж / (моль \cdot K) \cdot K}{z / моль \cdot Па} = \frac{Н \cdot м}{Н / м^2} = м^3.$$

Определим объемную долю аммиака в цехе

$$\varphi_{ам} = \frac{V_{ам}}{V} \cdot 100 = \frac{14,32}{8640} \cdot 100 = 0,16 \%$$

По табл.ПЗ Приложения концентрационные пределы воспламенения аммиака составляют, об.‰: нижний -15,0, верхний – 28. Следовательно, образовавшаяся смесь не взрывоопасна.

Ответ: 0,16 об.‰. Не взрывоопасна.

## 7. ВЕЛИЧИНЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ТЕХНОХИМИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ. ПРАВИЛА ВЫЧИСЛЕНИЯ

**Физическая величина** — свойство материального объекта или явления, общее в качественном отношении для класса объектов или явлений, но индивидуальное в количественном отношении для каждого из них.

Физические величины— это измеренные свойства физических объектов и процессов, с помощью которых они могут быть изучены.

Физические величины имеют единицу(измерения), размер и значение.

**Единица измерения** физической величины - это физическая величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное 1, и применяемая для количественного выражения однородных с ней физических величин.

Необходимость измерения величин разных размеров приводит к использованию нескольких единиц, которые отличаются друг от друга размерами. Например, единицы длины — метр, сантиметр, микрометр, ангстрем, парсек — отличаются размерами:  $1\text{ см} = 10^{-2}\text{ м}$ ;  $1\text{ мкм} = 10^{-6}\text{ м}$ ,  $1\text{ Å} = 10^{-6}\text{ м}$ ,  $1\text{ пк} = 3,0857 \cdot 10^{16}\text{ м}$ .

**Размер физической величины** — количественная определенность физической величины, присущая конкретному материальному объекту, системе, явлению или процессу.

Размер является объективной количественной характеристикой, не зависящей от выбора единиц измерений. Например, 1000 мг; 1 г; 0,001 кг – три варианта представления одного и того же размера. Каждый из них является

значением физической величины (в данном случае – массы) – выражением размера в тех или иных единицах измерений.

Измерить физическую величину — это значит выяснить, сколько раз в ней содержится однородная с ней величина, принятая за единицу. Это есть числовое значение физической величины.

**Значение физической величины** — выражение размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

Совокупность физических величин, образованная в соответствии с принятыми принципами, когда одни величины принимают за независимые, а другие определяют как функции независимых величин, называется **системой физических величин**.

Физическая величина, входящая в систему величин и условно принятая в качестве независимой от других величин этой системы, называется **основной**.

В Российской Федерации используется **система единиц СИ**, введенная ГОСТ 8.417–2002.

Эта Международная система единиц СИ обозначается символами LMTIΘN<sub>J</sub>, которые соответствуют символам основных физических величин: длине (L), массе (M), времени (T), силе электрического тока (I), температуре (Θ), количеству вещества (N) и силе света (J) (табл.8).

Система СИ (SI – от франц. Systeme International – The International System of Units), используемая в большинстве стран мира, была принята на XI Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) в 1960 г.

### *Производные единицы СИ*

Производные единицы могут быть выражены через основные с помощью математических операций — умножения и деления. Некоторым из производных единиц для удобства присвоены собственные наименования, такие единицы тоже можно использовать в математических выражениях для образования других производных единиц (табл.9).

Математическое выражение для производной единицы измерения вытекает из физического закона, с помощью которого эта единица измерения определяется, или из определения физической величины, для которой она вводится. Например, скорость — это расстояние, которое тело проходит в единицу времени  $v = \frac{l}{t}$ ; соответственно, единица измерения скорости — м/с (метр в секунду).

## Основные единицы физических величин системы СИ

| Величина                      |             |             | Единица измерения |                     |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------------|---------------------|
| Наименование                  | Размерность | Обозначение | Наименование      | Русское обозначение |
| Длина                         | L           | l           | метр              | м                   |
| Масса                         | M           | m           | килограмм         | кг                  |
| Время                         | T           | t           | секунда           | с                   |
| Сила электрического тока      | I           | I           | ампер             | А                   |
| Термодинамическая температура | $\Theta$    | T           | кельвин           | К                   |
| Количество вещества           | N           | n (v)       | моль              | моль                |
| Сила света                    | J           | J           | кандела           | кд                  |

**Размерность физической величины** (англ. dimension of a quantity) – выражение в форме степенного одночлена, составленного из произведений символов *основных физических величин* в различных степенях и отражающее связь данной физической величины с физическими величинами, принятыми в данной системе величин за основные с коэффициентом пропорциональности, равным 1.

При определении размерности, применяются стандартные математические операции — умножение, деление и сокращение степеней. Если после всех операций сокращений в размерности величины не осталось сомножителей с ненулевыми степенями, то величина называется *безразмерной*.

Таблица 9

## Производные единицы физических величин системы СИ

| Величина                                 | Единица, русское наименование | Обозначение        | Выражение через основные единицы                                                        |
|------------------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Плоский угол                             | радиан                        | рад                | $\text{м} \cdot \text{м}^{-1} = 1$                                                      |
| Телесный угол                            | стерадиан                     | ср                 | $\text{м}^2 \cdot \text{м}^{-2} = 1$                                                    |
| Температура Цельсия                      | градус Цельсия                | $^{\circ}\text{C}$ | К                                                                                       |
| Частота                                  | герц                          | Гц                 | $\text{с}^{-1}$                                                                         |
| Сила                                     | ньютон                        | Н                  | $\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2}$                                          |
| Энергия                                  | джоуль                        | Дж                 | $\text{Н} \cdot \text{м} = \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$              |
| Мощность                                 | ватт                          | Вт                 | $\text{Дж/с} = \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$                          |
| Давление                                 | паскаль                       | Па                 | $\text{Н/м}^2 = \text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$                      |
| Световой поток                           | люмен                         | лм                 | $\text{кд} \cdot \text{ср}$                                                             |
| Освещённость                             | люкс                          | лк                 | $\text{лм/м}^2 = \text{кд} \cdot \text{ср/м}^2$                                         |
| Электрический заряд                      | кулон                         | Кл                 | $\text{А} \cdot \text{с}$                                                               |
| Разность потенциалов                     | вольт                         | В                  | $\text{Дж/Кл} = \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1}$     |
| Сопротивление                            | ом                            | Ом                 | $\text{В/А} = \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-2}$       |
| Емкость                                  | фарад                         | Ф                  | $\text{Кл/В} = \text{с}^4 \cdot \text{А}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$    |
| Магнитный поток                          | вебер                         | Вб                 | $\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$                    |
| Магнитная индукция                       | тесла                         | Тл                 | $\text{Вб/м}^2 = \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$                     |
| Индуктивность                            | генри                         | Гн                 | $\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-2}$                    |
| Электрическая проводимость               | сименс                        | См                 | $\text{Ом}^{-1} = \text{с}^3 \cdot \text{А}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ |
| Активность радиоактивного источника      | беккерель                     | Бк                 | $\text{с}^{-1}$                                                                         |
| Поглощённая доза ионизирующего излучения | грей                          | Гр                 | $\text{Дж/кг} = \text{м}^2/\text{с}^2$                                                  |
| Эффективная доза ионизирующего излучения | зиверт                        | Зв                 | $\text{Дж/кг} = \text{м}^2/\text{с}^2$                                                  |
| Активность катализатора                  | катал                         | кат                | моль/с                                                                                  |

Размерность измеряемой физической величины является ее качественной характеристикой.

Размерность основных физических величин обозначается соответствующими заглавными буквами (см. табл.8). Например, размерность времени  $t$  обозначается  $\dim t = T$ , размерность длины  $l$  –  $\dim l = L$ , размерность массы  $m$  –  $\dim m = M$ .

Выражения для размерностей некоторых величин представлены в табл. 10.

Таблица 10

Примеры выражений для размерностей некоторых величин

| Величина  | Уравнение связи                                                          | Размерность в СИ | Наименование единицы измерения |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------------------|
| Ускорение | $a = \frac{v}{t} = \frac{l}{t^2}$                                        | $LT^{-2}$        | Нет                            |
| Сила      | $F = ma$                                                                 | $LMT^{-2}$       | Ньютон                         |
| Площадь   | $S = l^2$                                                                | $L^2$            | Квадратный метр                |
| Давление  | $P = \frac{F}{S} = \frac{ma}{l^2} = \frac{ml}{l^2 t^2} = \frac{m}{lt^2}$ | $ML^{-1}T^{-2}$  | Паскаль                        |

#### *Единицы, не входящие в СИ*

Некоторые единицы, не входящие в СИ, по решению Генеральной Конференции по мерам и весам (ГКМВ) «допускаются для использования совместно с СИ» (табл. 11). При использовании внесистемных единиц применяется переводной коэффициент для перехода к единицам СИ.

#### *Кратные и дольные единицы от единиц СИ*

Если установленные единицы для практических измерений физических величин оказываются слишком большими или слишком малыми, применяют десятичные кратные и дольные единицы от исходных единиц СИ.

**Кратная единица** – единица физической величины, в целое число раз большая системной или внесистемной единицы.

**Дольная единица** – единица физической величины, в целое число раз меньшая системной или внесистемной единицы.

Таблица 11

## Примеры некоторых внесистемных единиц СИ

| Единица                                   | Обозначение<br>русское | Величина в единицах<br>СИ                  |
|-------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------|
| <b>минута</b>                             | мин                    | 60 с                                       |
| <b>час</b>                                | ч                      | 60 мин = 3600 с                            |
| <b>сутки</b>                              | сут                    | 24 ч = 86 400 с                            |
| <b>литр</b>                               | л                      | 0,001 м <sup>3</sup>                       |
| <b>тонна</b>                              | т                      | 1000 кг                                    |
| <b>электронвольт</b>                      | эВ                     | $\approx 1,602\,177\,33 \cdot 10^{-19}$ Дж |
| <b>атомная единица массы,<br/>дальтон</b> | а. е. м.               | $\approx 1,660\,540\,2 \cdot 10^{-27}$ кг  |
| <b>морская миля</b>                       | миля                   | 1852 м (точно)                             |
| <b>гектар</b>                             | га                     | 10000 м <sup>2</sup>                       |
| <b>бар</b>                                | бар                    | 100000 Па                                  |
| <b>ангстрем</b>                           | Å                      | 10 <sup>-10</sup> м                        |

В метрической системе мер принята десятичная кратность между большими и меньшими единицами. В соответствии с резолюцией XI ГКМВ десятичные кратные и дольные единицы от единиц СИ образуются путем присоединения приставок.

Например, 1 км = 1000 = 10<sup>3</sup> м, т.е. единица длины *километр* кратна метру, а 1 мм = 0,001 = 10<sup>-3</sup> м, т.е. единица длины *миллиметр* является дольной. Множители и приставки для образования кратных и дольных единиц СИ приведены в табл. 12.

Подготовка данных в расчетах - важнейший этап вычислений, от которого зависит достоверность конечного результата.

Размерность используемых в формулах величин должна быть проверена на их совместимость.

Таблица 12

## Сокращения (кратные и дольные единицы)

| Сокращение      | Расшифровка                                                                                                             | Примечание                                                                                                                                       |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Экса...</b>  | $10^{18}$ исходных единиц.<br>Обозначения: Э.                                                                           | -                                                                                                                                                |
| <b>Пега...</b>  | $10^{15}$ исходных единиц.<br>Обозначения: П.                                                                           | -                                                                                                                                                |
| <b>Тера...</b>  | $10^{12}$ исходных единиц.<br>Сокращённое обозначение:<br>русское Т,<br>Пример: 1 <i>Тн</i> (тераньютон) = $10^{12}$ н. | (греч. téras — чудовище)                                                                                                                         |
| <b>Гига...</b>  | $10^9$ исходных единиц.<br>Сокращённые обозначения:<br>русское - Г.<br>Пример: 1 <i>Гц</i> (гигагерц) = $10^9$ гц.      | (греч. gígas — гигантский)                                                                                                                       |
| <b>Мега...</b>  | $10^6$ исходных единиц.<br>Сокращённое обозначение:<br>русское М.<br>Пример: 1 <i>Мвт</i> (мегаватт) = $10^6$ вт        | (греческого mégas — большой), часть сложных слов, указывающая на большой размер чего-либо.                                                       |
| <b>Кило...</b>  | $10^3 = 1000$ исходных единиц.<br>Сокращённые обозначения:<br>русское к,                                                | (франц. kilo..., от греч. chílioi — тысяча), Приставка пишется слитно с наименованием исходной единицы. Пример: 1 <i>км</i> (километр) = 1000 м. |
| <b>Гекто...</b> | $10^2 = 100$ исходных единиц.<br>Сокращённое обозначение:<br>русское г,                                                 | (греч. hekatón — сто), Пример образования кратной единицы с приставкой гекто: 1 <i>гвт</i> (гектоватт) = 100 вт (ватт).                          |
| <b>Дека...</b>  | 10 исходных единиц.<br>Обозначения: русское да,                                                                         | (греч. deka — десять), Например, 1 <i>дал</i> (декалитр) = 10 л.                                                                                 |

| Сокращение      | Расшифровка                                                                          | Примечание                                                                                                         |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Дечи...</b>  | $10^{-1} = \frac{1}{10}$ от исходной.<br>Обозначения: русское <i>д</i> ,             | (лат. <i>decern</i> — десять),<br>Например, 1 <i>дм</i> = 0,1 <i>м</i> .                                           |
| <b>Сант...</b>  | $10^{-2} = \frac{1}{100}$ исходных единиц.<br>Обозначения: русское <i>с</i>          | (франц. <i>cent</i> , лат. <i>centum</i> — сто), Примеры: 1 <i>см</i> = 0,01 <i>м</i> ; 1 <i>сст</i> = 0,01стокса. |
| <b>Милли...</b> | $10^{-3} = \frac{1}{1000}$ исходных единиц.<br>Обозначения: русское <i>м</i> ,       | (лат. <i>mille</i> — тысяча),<br>Пример: 1 <i>ма</i> (миллиампер) = $10^{-3}$ <i>а</i> .                           |
| <b>Микро...</b> | $10^{-6}$ . Одна миллионная доля исходных единиц.<br>Обозначения: русское <i>мк</i>  | (греч. <i>mikrós</i> — малый, маленький), Пример: 1 <i>мксек</i> (микросекунда) = $10^{-6}$ <i>сек</i> .           |
| <b>Нано...</b>  | $10^{-9}$ . Одна миллиардная доле исходной единицы.<br>Обозначения: русское <i>н</i> | (греч. <i>nános</i> — карлик),<br>Пример: 1 <i>нм</i> (нанометр) = $10^{-9}$ <i>м</i> .                            |
| <b>Пико...</b>  | $10^{-12}$ исходной единицы.<br>Обозначения: русское <i>п</i>                        | (исп. <i>piso</i> - малая величина),<br>Пример: 1 <i>пф</i> (пикофарада) = $10^{-12}$ <i>ф</i>                     |
| <b>Фемто...</b> | $10^{-15}$ доле исходных единиц.<br>Обозначение: русское <i>ф</i>                    | (дат. <i>femten</i> — пятнадцать),<br>Пример: 1 <i>фк</i> (фемтокулон) = $10^{-15}$ <i>к</i>                       |
| <b>Атто...</b>  | $10^{-18}$ от исходной.<br>Сокращённое обозначение: русское - <i>а</i> .             | Например, 1 <i>ат</i> = $10^{-18}$ <i>м</i> .                                                                      |

В формулах, имеющих физический смысл, только величины, имеющие одинаковую размерность, могут складываться, вычитаться или сравниваться. Например, сложение массы какого-либо предмета с длиной другого предмета не имеет смысла. Также невозможно сравнить, что больше: 10 кг или 10 км. Поэтому левые и правые части уравнений должны иметь одинаковую размерность. Кроме того, аргументы экспоненциальных, логарифмических и тригонометрических функций должны быть безразмерными величинами.

Эти правила можно использовать для проверки правильности физических формул или правильности единиц измерения величин, подставляемых в формулу.

**Пример 20.** Из уравнения Менделеева-Клапейрона выразить объем газа и определить в каких единицах нужно подставить в формулу величины, чтобы объем газа получился в  $\text{м}^3$ .

Решение. Выразим объем газа из уравнения Менделеева-Клапейрона

$$V_z = \frac{m_z \cdot R \cdot T}{M_z \cdot P}.$$

Единицы измерения величин возьмем следующие

$m_z$  – масса газа, г;

$M_z$  – молярная масса газа, г/моль;

$P$  – давление газа, Па;

$V$  – объем газа,  $\text{м}^3$ ;

$T$  – абсолютная температура газа, К;

$R$  – универсальная газовая постоянная 8,314 Дж/(моль·К).

Проверим правильность выбранных единиц измерения величин, входящих в формулу

$$[V_z] = \frac{г \cdot Дж / (моль \cdot К) \cdot К}{г / моль \cdot Па} = \frac{Н \cdot м}{Н / м^2} = м^3.$$

## 8. УСЛОВИЕ ЗНАЧИМОСТИ ЦИФР. ПРАВИЛА ВЫЧИСЛЕНИЯ

При обработке результатов экспериментов и выполнении расчетов многие студенты ошибочно считают, что чем больше цифр после запятой они запишут, тем точнее будет результат. Нужно понимать, что результат любого измерения всегда отличается от действительного значения измеряемой величины вследствие погрешностей измерения.

Например, если пятнадцать миллилитров раствора измерено цилиндром с погрешностью  $\pm 1$  мл, то результат измерения запишется как  $V = 15 \pm 1$  мл.

Если же пятнадцать миллилитров раствора отмерены бюреткой с погрешностью  $\pm 0,01$  мл, то результат измерения следует записать как  $V = 15,00 \pm 0,01$  мл.

При такой записи чисел мы понимаем, что действительное значение объема раствора, измеренного цилиндром, лежит в пределах  $14 \text{ мл} \leq V \leq 16 \text{ мл}$ , а при измерении бюреткой - в пределах  $14,99 \text{ мл} \leq V \leq 15,01 \text{ мл}$ .

**Пример 21.** Выполнив несколько параллельных измерений результатов титрования по бюретке с погрешностью  $\pm 0,01$  мл, студент получил усредненный результат 15,121667 мл. Как правильно записать результат?

Студент записал как 15,121667 мл, считая, что это будет точнее, чем, например, 15,12 мл. Однако, первая запись не имеет смысла, т.к. если мы допускаем ошибку в сотых долях, то тысячным, десятитысячным долям и т.д. тем более, веры нет. Правильная запись будет 15,12 или с указанием погрешности  $15,12 \pm 0,01$ .

Чтобы не было ложного впечатления о большей, чем есть на самом деле, точности результатов, необходимо всегда производить округления.

### *Округление результатов*

При округлении результатов придерживаются следующих правил:

результаты расчетов следует выражать только *значащими цифрами*, независимо от того, сколько цифр входило в числа, использованные при расчетах.

**Значащими** называют все достоверно известные цифры плюс первая из недостоверных. Следовательно, все результаты следует округлять **до первой недостоверной цифры**.

Определить, какие из экспериментально полученных цифр достоверны и какую цифру следует считать недостоверной, не всегда просто. В общем случае недостоверность принимают равной  $\pm 1$  в последней значащей цифре. Есть числа, которые считают абсолютно достоверными. Например, число опытов, число проанализированных проб, число электронов, участвующих в реакции.

Если известно, какие цифры в числе являются достоверными и за первой недостоверной цифрой следует цифра **меньше 5**, округления проводят простым отбрасыванием цифр. Например, если в числе 171,26324 первой из недостоверных является:

- цифра 6, то округление будет следующим:  $171,26324 \approx 171,26$ ;
- цифра 3:  $171,26324 \approx 171,263$ ;
- цифра 1:  $171,26324 \approx 171$ .

Если за первой недостоверной цифрой следует цифра **больше 5**, то последняя из остающихся цифр увеличивается на 1. Например, если в числе 116,76382 является уже недостоверной:

- цифра 3, то округление будет следующим:  $116,76382 \approx 116,764$ ;
- цифра 7:  $116,76382 \approx 116,8$ .

Если за первой недостоверной цифрой следует **цифра 5**, округления проводят в сторону ближайшего четного числа. Например, число 172,265 нужно округлить до 172,26, если цифра 6 недостоверна (т.е. до пяти значащих цифр).

**Пример 22.** Округлить числа 6,146 и 87,34 до трех значащих цифр.

Решение.  $6,146 \approx 6,15$ ;  $87,34 \approx 87,3$ .

Округлять следует конечный результат после выполнения всех арифметически действий.

### *Обращение с нулями*

Ноль в числе может быть значащей и незначащей цифрой.

**Нули, стоящие в начале числа, не являются значащими цифрами** и служат лишь для указания места запятой в десятичной дроби. Например, число 0,05 содержит только одну значащую цифру, число 0,0005 - тоже одну.

**Нули, стоящие между другими цифрами, всегда значимы.** Например, число 0,709 содержит три значащие цифры, число 0,03005 - четыре.

**Нули в конце числа могут быть значимы и незначимы.**

Если в числе 580000 все цифры значимы, то его следует записывать именно так - 580000.

Если же значащими являются только первые две цифры, а нули незначимы, то число следует представить в нормальном виде, т.е. в виде произведения

$$a \cdot 10^n, \text{ где } 1 < a < 10.$$

В нашем примере -  $5,8 \cdot 10^5$ .

Число 300 с одной значащей цифрой, следует записать  $3 \cdot 10^2$ , если две значащие цифры -  $3,0 \cdot 10^2$ , если три значащие цифры -  $3,00 \cdot 10^2$ .

Записи 25,2 и 25,200 различны. Запись 25,200 означает, что верны сотые и тысячные доли. В записи 25,2 – верны только целые и десятые доли.

### *Задание*

**8.1.** Округлить результат до ... значащей цифры:

|                   |          |          |          |          |          |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Число             | 1716,415 | 82,59363 | 15,05941 | 11,03890 | 4,109203 |
| Значащие<br>цифры | 3        | 1        | 1        | 4        | 4        |

|                   |          |          |          |          |          |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Число             | 13,96337 | 6,132209 | 3,323886 | 22,81975 | 1,858262 |
| Значащие<br>цифры | 3        | 1        | 3        | 2        | 4        |

|                   |          |          |          |          |          |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Число             | 1,421967 | 14,30838 | 11,39710 | 12,78266 | 10,91005 |
| Значащие<br>цифры | 4        | 3        | 3        | 1        | 3        |

**8.2.** Как правильно записать число ... в виде произведения числа на  $10^n$ , если оно имеет одну, две, три, четыре значащих цифры?

|       |            |             |          |        |         |
|-------|------------|-------------|----------|--------|---------|
| Число | 10000      | 523890      | 78559    | 2134   | 1000    |
| Число | 0,00065498 | 0,000005238 | 0,007855 | 0,7093 | 0,05015 |

### *Сложение и вычитание*

Значимость суммы или разности определяется значимостью числа с наименьшим количеством десятичных знаков (или с наибольшей абсолютной недостоверностью).

**Пример 23.** Записать результат вычисления

а)  $15,6 + 3 + 0,21 = 18,81 \approx 19$ .

Значимость суммы определяется недостоверностью числа 3 (целое число), следовательно, результат надо округлить до целого числа, т.е. до 19.

б)  $50,1 + 2,0 + 0,55 = 52,65 \approx 52,6$ .

в)  $10,00 + 10,5300 + 0,320 = 20,85 \approx 20,85$ .

Числа, содержащие степени, преобразуют, приводя показатели степеней к наибольшей.

**Пример 24.** Записать результат вычисления

а)  $5 \cdot 10^{-5} + 1,00 \cdot 10^{-2} + 4,8 \cdot 10^{-3} = 0,005 \cdot 10^{-2} + 1,00 \cdot 10^{-2} + 0,48 \cdot 10^{-2} = 1,485 \cdot 10^{-2} \approx 1,49 \cdot 10^{-2}$

Значимость этой суммы определяется значимостью чисел с двумя десятичными знаками.

$$б) \quad 5,00 \cdot 10^{-5} + 2,00 \cdot 10^{-3} + 1,152 \cdot 10^{-2} + 0,0432 = 0,005 \cdot 10^{-2} + 0,200 \cdot 10^{-2} + 1,152 \cdot 10^{-2} + 4,32 \cdot 10^{-2} \approx 5,68 \cdot 10^{-2}.$$

**Пример 25.** Записать результат вычисления молярной массы  $K_2SO_4$ , если относительные атомные массы элементов равны:

K- 39,102; S- 32,064; O- 15,9994.

Какое из слагаемых лимитирует точность результата?

Решение:  $M(K_2SO_4) = 2 \cdot 39,102 + 32,064 + 4 \cdot 15,9994 = 78,204 + 32,064 + 63,9976 = 174,2656 \text{ г/моль}.$

Значимость суммы определяется значимостью числа с наименьшим числом десятичных знаков. В данном случае точность лимитирует число 78,204 или 32,064 (три десятичных знака), поэтому результат следует записать: 174,266 г/моль.

### *Умножение и деление*

Обычно для оценки значимости произведения или частного пользуются следующим упрощенным правилом:

значимость произведения или частного определяется значимостью сомножителя с наименьшим числом значащих цифр.

**Пример 26.** Записать результат вычисления

а)  $2,5 \cdot 3,75$ .

При умножении с помощью калькулятора получим  $2,5 \cdot 3,75 = 9,375$ . В сомножителе 2,5 содержится две значащие цифры, в сомножителе 3,75 - три. Правильное округление даст результат 9,4, содержащий две значащие цифры.

$$б) \quad \frac{1,00 \cdot 10^4 \cdot 5,5}{2,000}.$$

Результат вычисления на калькуляторе:

$$\frac{1,00 \cdot 10^4 \cdot 5,5}{2,000} = 2,75 \cdot 10^4 = 2,8 \cdot 10^4$$

Так как сомножитель 5,5 содержит наименьшее число значащих цифр (2), то результат тоже нужно округлить до двух значащих цифр:  $2,75 \cdot 10^4 \approx 2,8 \cdot 10^4$ .

Более строгий подход основан на сравнении относительных недостоверностей сомножителей и произведения (или частного). Относительная недостоверность  $E_r$  равна отношению абсолютной недостоверности числа  $E_a$  к самому числу. **Относительная недостоверность произведения (или частного)  $E_r$  равна сумме относительных**

**недостоверностей сомножителей.** Например, нужно найти частное  $98:87,25$ . Относительные недостоверности сомножителей составляют (приблизленно):  $1:98 = 1 \cdot 10^{-2}$  и  $0,01:87,25 = 1 \cdot 10^{-4}$ . Следовательно, относительная недостоверность частного  $E_r = 0,01 + 0,0001 = 1 \cdot 10^{-2}$ . При делении чисел с помощью калькулятора получаем число 1,1232... Поскольку недостоверна вторая цифра после запятой, частное следует округлить до 1,12.

### *Возведение в степень*

При возведении числа в степень относительная недостоверность результата увеличивается в число раз, равное показателю степени.

Например, при возведении в квадрат она удваивается, в куб - утраивается и т.д.

**Пример 27.** Записать результат вычисления:

а)  $(2,00)^2$ .

Определим относительную недостоверность числа 2,00:

$$E_r = 2 \cdot \frac{0,01}{2,00} = 0,01,$$

тогда абсолютная недостоверность результата будет:  $E_a = 2^2 \cdot 0,01 = 0,04$ .

Запишем результат вычислений:  $(2,00)^2 = 4,00 \pm 0,04 = 4,0$ .

б)  $(2,0)^2$ .

$$E_r = 2 \cdot \frac{0,1}{2,00} = 0,1, \text{ тогда } E_a = 2^2 \cdot 0,1 = 0,4.$$

Запишем результат вычислений:  $(2,0)^2 = 4,0 \pm 0,4 = 4$ .

в)  $(2,00)^5$ .

$$E_r = 5 \cdot \frac{0,01}{2,00} = 0,025, \text{ тогда } E_a = 2^5 \cdot 0,0025 = 0,8.$$

Запишем результат вычислений:  $(2,00)^5 = 32,00 \pm 0,8 = 32$ .

г)  $(2,0)^5$ .

$$E_r = 5 \cdot \frac{0,1}{2,0} = 0,25, \text{ тогда } E_a = 2^5 \cdot 0,25 = 8.$$

Запишем результат вычислений:  $(2,0)^5 = 32,0 \pm 8 = 3 \cdot 10$ .

Так как недостоверность числа 32 составляет восемь целых, то его лучше представить как  $3 \cdot 10$ , а не 30 или 32.

д)  $(1,365)^2$ .

$$E_r = 2 \cdot \frac{0,001}{1,365} = 0,001, \text{ тогда } E_a = 1,365^2 \cdot 0,001 = 0,002.$$

Запишем результат вычислений:  $(1,365)^2 = 1,863225 \pm 0,002 = 1,86$ .

Таким образом, при возведении числа в степень количество значащих цифр, как правило, уменьшается на одну, так как относительная недостоверность результата  $x^n$  в  $n$  раз больше относительной недостоверности числа  $x$ .

### *Извлечение корня*

При извлечении корня относительная недостоверность результата уменьшается, так как относительная недостоверность результата  $\sqrt[n]{x}$  в  $n$  раз меньше относительной недостоверности подкоренного числа  $x$  и существенно зависит от  $n$ .

Например, относительная недостоверность результата извлечения квадратного корня вдвое меньше относительной недостоверности подкоренного числа, поэтому в некоторых случаях после извлечения корня число значащих цифр увеличивается.

**Пример 28.** Записать результат вычисления:

а)  $\sqrt[5]{32}$ .

$$E_r = \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{32} = 0,00625 = 6 \cdot 10^{-3}, \text{ тогда } E_a = 2,00 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 0,01.$$

Запишем результат вычислений:  $\sqrt[5]{32} = 2,00 \pm 0,01 = 2,00$ .

б)  $\sqrt{4,00}$

$$E_r = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,01}{4,00} = 0,00125 = 1 \cdot 10^{-3}, \text{ тогда } E_a = 2,000 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 10^{-3}.$$

Запишем результат вычислений:  $\sqrt{4,00} = 2,000 \pm 0,002 = 2,00$ .

в)  $\sqrt{32}$ .

$$E_r = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{32} = 0,016, \text{ тогда } E_a = 5,657 \cdot 0,016 = 0,09.$$

Запишем результат вычислений:  $\sqrt{32} = 5,657 \pm 0,09 = 5,7$ .

### Логарифмирование

При логарифмировании числа результат должен содержать столько десятичных знаков, сколько значащих цифр содержалось в нестепенном члене логарифмируемого числа. Значащими цифрами логарифма являются только цифры мантиссы\*. Характеристика не является значащей цифрой, так как она указывает лишь на порядок логарифмируемого числа.

*\*Мантисса – дробная часть десятичного логарифма. Целая часть десятичного логарифма называется его характеристикой*

*$\lg 200 \approx 2,3010$ . Здесь 0,3010 – мантисса данного логарифма, а 2 – его характеристика.*

**Пример 29.** Записать результат вычисления:

а)  $\lg 5,00 \cdot 10^3$ .

$$\lg 5,00 \cdot 10^3 = 3,69897 = 3,699, \text{ т.к. число } 5,00 \text{ содержит три значащие цифры.}$$

б)  $\lg 0,1 \cdot 10^{-2}$ .

$$\lg 0,1 \cdot 10^{-2} = -3,0, \text{ т.к. число } 0,1 \text{ содержит одну значащую цифру.}$$

в)  $\lg 0,10 \cdot 10^{-2}$ .

$$\lg 0,10 \cdot 10^{-2} = -3,00, \text{ т.к. число } 0,10 \text{ содержит две значащие цифры.}$$

**Пример 30. а)** Вычислить значение pH для  $2,9 \cdot 10^{-3}$  М раствора  $\text{HNO}_3$ .

$$\text{pH} = -\lg[\text{H}^+] = -\lg[2,9 \cdot 10^{-3}] = 2,5376 = 2,54$$

**б)** Вычислить значение pH для  $7,35 \cdot 10^{-4}$  М раствора  $\text{HNO}_3$ .

$$\text{pH} = -\lg[\text{H}^+] = -\lg[7,35 \cdot 10^{-4}] = 3,1337 = 3,134.$$

При вычислении антилогарифмов число значащих цифр результата равно числу десятичных цифр мантиссы логарифма.

Например, антилогарифм величины 0,56 т.е.  $10^{0,56}=3,6308=3,6$ .

**Пример 31.** Рассчитать концентрацию ионов  $H^+$  в растворе с рН 3,55.

$$[H^+] = 10^{-3,55} = 2,81838 \cdot 10^{-4} = 2,82 \cdot 10^{-4} \text{ моль/дм}^3.$$

Во всех промежуточных результатах следует сохранять одной цифрой более, чем рекомендуют предыдущие правила. В окончательном результате эта запасная цифра отбрасывается.

## ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

### Задача 1 (газовые законы)

Варианты 1, 6, 11

1. Молярная масса смеси, состоящей из аргона и гелия, равна 13 г/моль. Определите массу гелия в смеси объемом 11,2 л.  
1,5 г.

Варианты 2, 7, 12

2. Какую массу имеет 608 мл  $O_2$  при температуре 25 °С и давлении 745 мм рт. ст.?  
0,78 г.

Варианты 3, 8, 13

3. При температуре 27 °С и давлении 800 мм рт. ст. масса 380 мл газа равна 0,455 г. Рассчитайте молярную массу газа.  
28 г/моль.

Варианты 4, 9, 14

4. Какова массовая доля  $H_2$  в его смеси с  $N_2$ , имеющей плотность 0,832 г/л при давлении 120 кПа и температуре -30 °С? (2,86%).

Варианты 5,10,15

5. Газ количеством вещества 0,25 моль имеет массу 5 г. Рассчитайте:

а) объем газа (л) при н.у;

б) молярную массу газа;

в) плотность газа по гелию;

а) 5,6 л;    б) 20 г/моль;    в) 5;

Варианты 16, 18, 20

Определить среднюю молярную массу и плотность воздуха (при н.у.), имеющего следующий состав ф, об. %:  $O_2$  -20,0;  $N_2$  – 79,0; Ar -1,0.

Варианты 17, 19

Средняя молярная масса газовой смеси, содержащей CO и CO<sub>2</sub>, в 2 раза тяжелее неона. Определить молярное соотношение между оксидами углерода в этой смеси. (CO:CO<sub>2</sub>=1:3).

### Задача 2 (состав газовой смеси)

Газовая смесь количеством 400 кмоль имеет следующий состав ф, об. %: Н<sub>2</sub>-27,3; О<sub>2</sub> -49,9, СО<sub>2</sub> -5,3, СН<sub>4</sub> -2,5; N<sub>2</sub> -15,0 (при н.у.).

Рассчитать конечный состав газовой смеси в масс% и об. %: (табл.)

| Из газовой смеси:                         | 1<br>(11) | 2<br>(12) | 3<br>(13) | 4<br>(14) | 5<br>(15) | 6<br>(16) | 7<br>(17) | 8<br>(18) | 9<br>(19) | 10<br>(20) |
|-------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Удалено О <sub>2</sub> , кг               | 290       |           |           |           |           |           | 100       |           |           |            |
| Добавлено О <sub>2</sub> , м <sup>3</sup> |           | 300       |           |           |           |           |           | 150       |           |            |
| Удалено О <sub>2</sub> , м <sup>3</sup>   |           |           |           |           | 280       |           |           |           | 180       |            |
| Добавлено СН <sub>4</sub> ,<br>кмоль      |           |           | 25        |           |           |           |           |           |           | 15         |
| Добавлено СН <sub>4</sub> , кг            |           |           |           | 37        |           |           |           |           |           |            |
| Удалено N <sub>2</sub> , м <sup>3</sup>   |           |           |           |           |           | 10        |           |           |           |            |

### Задача 3 (приготовление растворов)

Определить объемы растворов серной кислоты с концентрациями ω<sub>1</sub> и ω<sub>2</sub> (масс. %), которые необходимо взять для приготовления ... кг раствора серной кислоты с концентрацией ω<sub>см</sub>. Плотности растворов Н<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> приведены в табл. П1 Приложения.

| Исходные данные                                                 | Вариант |    |    |    |    |    |     |    |    |    |
|-----------------------------------------------------------------|---------|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|
|                                                                 | 1       | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7   | 8  | 9  | 10 |
| Концентрации<br>исходных растворов,<br>%<br>ω <sub>1</sub>      | 80      | 92 | 90 | 75 | 65 | 55 | 95  | 83 | 68 | 73 |
| ω <sub>2</sub>                                                  | 35      | 70 | 68 | 50 | 35 | 35 | 72  | 68 | 30 | 45 |
| Концентрация<br>приготовленного<br>раствора ω <sub>см</sub> , % | 60      | 83 | 85 | 67 | 40 | 48 | 80  | 75 | 40 | 66 |
| Масса<br>приготовленного<br>раствора, кг                        | 50      | 10 | 1  | 3  | 9  | 10 | 100 | 20 | 25 | 50 |

В наличии имеется азотная кислота с концентрацией  $\omega_1$ . Сколько нужно взять воды, чтобы получить  $m$  кг азотной кислоты с концентрацией  $\omega_2$ ?

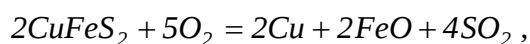
| Исходные данные                                      | Вариант |      |    |    |    |    |     |    |    |    |
|------------------------------------------------------|---------|------|----|----|----|----|-----|----|----|----|
|                                                      | 11      | 12   | 13 | 14 | 15 | 16 | 17  | 18 | 19 | 20 |
| Концентрация исходного раствора, масс. % $\omega_1$  | 60,0    | 70,0 | 56 | 67 | 40 | 45 | 80  | 75 | 40 | 65 |
| Концентрация приготовленного раствора $\omega_2$ , % | 35      | 18   | 20 | 50 | 15 | 35 | 28  | 40 | 30 | 45 |
| Масса приготовленного раствора, кг                   | 5       | 10   | 1  | 3  | 7  | 10 | 100 | 20 | 25 | 50 |

#### Задача 4 (стехиометрические расчеты)

Обжиговый газ, содержащий об. %:  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_2$ , остальное -  $\text{N}_2$ , подвергнут каталитическому окислению по реакции  $\text{SO}_2 + 1/2 \text{O}_2 = \text{SO}_3$ . Рассчитать состав газовой смеси после окисления в об. % по исходным данным табл.

| Исходные данные                       | Вариант |      |    |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------|---------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|
|                                       | 1       | 2    | 3  | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| Состав исходной газовой смеси, об. %  |         |      |    |      |      |      |      |      |      |      |
| $\text{SO}_2$                         | 8,0     | 7,0  | 6  | 8,5  | 7,5  | 9,0  | 8,0  | 7,5  | 7,8  | 8,5  |
| $\text{O}_2$                          | 12,0    | 11,0 | 10 | 10,0 | 10,5 | 11,0 | 9,0  | 11,5 | 10,0 | 10,2 |
| Степень превращения $\text{SO}_2$ , % | 88      | 97   | 98 | 90   | 95   | 98   | 97,5 | 96,0 | 97,8 | 97,0 |

Определить объем  $\text{SO}_2$  и массы веществ, оставшихся и образовавшихся в результате выплавки меди из  $m_x$  кг халькопирита по реакции



если начальный объем кислорода был  $V_0$  (н.у.).

| Исходные данные | Вариант |     |     |     |     |     |     |      |     |     |
|-----------------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|
|                 | 11      | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18   | 19  | 20  |
| $m_x$ кг        | 2       | 2   | 1   | 1,5 | 3   | 3   | 4   | 4,5  | 5   | 3,5 |
| $V_0$ , л       | 700     | 500 | 600 | 700 | 850 | 300 | 950 | 1000 | 800 | 500 |

### Задача 5 (теплота сгорания твердого и жидкого топлива)

Определить низшую и высшую теплоту сгорания топлива, используя данные в соответствии с вариантом.

| Вариант | Топливо        | W, масс.% | A, масс.% | Состав горючей массы, масс.% |      |     |     |      |
|---------|----------------|-----------|-----------|------------------------------|------|-----|-----|------|
|         |                |           |           | C                            | H    | S   | N   | O    |
| 1.      | Каменный уголь | 21,0      | 17,0      | 85,0                         | 3,0  | 0,5 | 1,5 | 10,0 |
| 2.      | Каменный уголь | 8,0       | 16,0      | 80,5                         | 5,4  | 4,3 | 1,5 | 8,3  |
| 3.      | Каменный уголь | 4,5       | 16,0      | 90,0                         | 4,2  | 2,2 | 1,5 | 2,1  |
| 4.      | Каменный уголь | 5,0       | 7,0       | 92,5                         | 2,0  | 1,5 | 1,5 | 2,5  |
| 5.      | Мазут          | 2,0       | 1,0       | 87,2                         | 11,7 | 0,5 | 0,3 | 0,3  |
| 6.      | Бурый уголь    | 29,0      | 20,0      | 70,0                         | 4,5  | 0,6 | 1,3 | 23,6 |
| 7.      | Бурый уголь    | 12,0      | 34,0      | 65,0                         | 4,5  | 3,0 | 2,5 | 25,0 |
| 8.      | Торф           | 50,0      | 22,0      | 57,8                         | 6,0  | 0,3 | 2,5 | 33,4 |
| 9.      | Каменный уголь | 4,0       | 6,0       | 94,0                         | 1,8  | 1,9 | 1,0 | 1,3  |
| 10.     | Древесина      | 40,0      | 2,5       | 50,0                         | 7,0  | -   | 0,5 | 42,5 |
| 11.     | Мазут          | 3,0       | 0,2       | 87,4                         | 11,2 | 0,5 | 0,4 | 0,5  |
| 12.     | Мазут          | 3,0       | 0,3       | 87,6                         | 11,7 | 0,7 | 0,5 | 0,5  |

|     |                |      |      |      |      |     |      |      |
|-----|----------------|------|------|------|------|-----|------|------|
| 13. | Древесина      | 45,0 | 3,0  | 48,0 | 8,0  | -   | 0,7  | 43,3 |
| 14. | Мазут          | 4,0  | 0,3  | 87,3 | 10,8 | 0,8 | 0,55 | 0,55 |
| 15. | Торф           | 55,0 | 41,0 | 60,0 | 5,0  | 1,0 | 3,5  | 30,5 |
| 16. | Мазут          | 1,0  | 0,1  | 85,2 | 11,6 | 2,5 | 0,35 | 0,35 |
| 17. | Каменный уголь | 3,5  | 5,0  | 93,0 | 1,7  | 1,9 | 1,1  | 2,3  |
| 18. | Бурый уголь    | 25,0 | 19,0 | 68,0 | 3,5  | 2,1 | 1,8  | 24,6 |
| 19. | Каменный уголь | 6,0  | 6,0  | 93,0 | 1,9  | 1,3 | 1,4  | 2,4  |
| 20. | Каменный уголь | 9,0  | 16,0 | 86,0 | 5,0  | 0,7 | 2,0  | 6,3  |

### Задача 6 (теплота сгорания газообразного топлива)

Определить теплоту сгорания газообразного топлива

| Вариант | Топливо                   | Содержание компонентов, об. % |                               |                               |                                |                |      |                |                  |                 |                |
|---------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------|------|----------------|------------------|-----------------|----------------|
|         |                           | CH <sub>4</sub>               | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | O <sub>2</sub> | CO   | H <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
| 1.      | Попутный газ              | 50,0                          | 16,0                          | 11,0                          | 6,0                            | -              | -    | -              | 0,3              | 11,0            | 5,7            |
| 2.      | Природный газ             | 93,2                          | 4,5                           | 0,9                           | 0,7                            | -              | -    | -              | -                | 0,1             | 0,6            |
| 3.      | Природный газ             | 98,2                          | 1,33                          | 0,12                          | 0,15                           | -              | -    | -              | -                | 0,1             | 0,1            |
| 4.      | Генераторный газ          | 0,5                           | -                             | -                             | -                              | -              | 33,0 | 1,0            | -                | 0,5             | 65             |
| 5.      | Газ подземной газификации | 23,0                          | 2,0                           | -                             | -                              | -              | 14,3 | 40,0           | 0,5              | 2,0             | 8,5            |
| 6.      | Коксовый газ              | 21,8                          | 1,0                           | 0,6                           | 0,4                            | 0,9            | 6,6  | 61,2           | -                | 2,5             | 5,0            |
| 7.      | Попутный газ              | 30,0                          | 17,0                          | 17,9                          | 9,0                            | -              | -    | -              | -                | 0,6             | 25,5           |
| 8.      | Коксовый газ              | 24,8                          | 1,5                           | 1,0                           | 0,7                            | 0,7            | 5,3  | 55,8           | -                | 3,1             | 7,1            |
| 9.      | Природный газ             | 94,6                          | 3,3                           | 0,9                           | 0,7                            | -              | -    | -              | -                | 0,3             | 0,2            |
| 10.     | Биогаз                    | 57,8                          | -                             | -                             | -                              | -              | -    | 0,4            | 0,3              | 41              | 0,5            |

|     |               |      |      |      |      |     |     |     |      |      |     |
|-----|---------------|------|------|------|------|-----|-----|-----|------|------|-----|
| 11. | Природный газ | 98,6 | 0,2  | 0,1  | -    | -   | -   | -   | -    | 0,1  | 1,0 |
| 12. | Биогаз        | 66,8 | -    | -    | -    | -   | -   | 0,5 | 0,4  | 32   | 0,3 |
| 13. | Природный газ | 86,7 | 3,9  | 1,7  | 0,9  | -   | -   | -   | -    | 0,1  | 6,7 |
| 14. | Попутный газ  | 77,4 | 5,9  | 8,4  | 4,2  | -   | -   | -   | -    | 3,5  | 0,6 |
| 15. | Биогаз        | 66,8 | -    | -    | -    | -   | -   | 0,5 | 0,4  | 32   | 0,3 |
| 16. | Природный газ | 98,8 | 0,3  | 0,2  | 0,1  | -   | -   | -   | -    | 0,2  | 0,4 |
| 17. | Коксовый газ  | 24,2 | 1,2  | 0,5  | 0,5  | 0,7 | 4,2 | 67  | -    | 2,2  | 5,8 |
| 18. | Природный газ | 53,0 | 4,2  | 0,9  | 0,5  | -   | -   | -   | 21,0 | 18,5 | 1,9 |
| 19. | Попутный газ  | 63,5 | 11,5 | 11,4 | 12,4 | -   | -   | -   | -    | 0,3  | 9,0 |
| 20. | Природный газ | 54,9 | 3,2  | 1,2  | 0,7  | -   | -   | -   | 20,0 | 18,0 | 2,0 |

### Задача 7 (объем воздуха для горения)

#### Индивидуальное вещество

Рассчитать объем воздуха, необходимый для полного сгорания вещества, если горение протекает с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$ . Условия горения и количество вещества указаны в таблице.

| Вариант | Вещество                       | Количество         | Условия горения |           |          |
|---------|--------------------------------|--------------------|-----------------|-----------|----------|
|         |                                |                    | Температура     | Давление  | $\alpha$ |
| 1.      | Этанол $C_2H_5OH$              | 10 кг              | 1800 К          | 87000 Па  | 1,8      |
| 2.      | Метанол $CH_3OH$               | 1 кг               | 600 К           | 1,2 ат    | 1,5      |
| 3.      | Диметиловый эфир $H_3C-O-CH_3$ | 5 кг               | 1600 К          | 1 ат      | 1,4      |
| 4.      | Глицерин $C_3H_5(OH)_3$        | 3 кг               | 1600 К          | 1 ат      | 2,1      |
| 5.      | Водород $H_2$                  | 10 м <sup>3</sup>  | 165 К           | 101,3 кПа | 2,0      |
| 6.      | Метан $CH_4$                   | 100 м <sup>3</sup> | 1500 К          | 101300 Па | 1,2      |
| 7.      | Пропан $C_3H_8$                | 20 м <sup>3</sup>  | 20 °С           | 101,3 кПа | 2,0      |
| 8.      | Ацетилен $C_2H_2$              | 5 м <sup>3</sup>   | 40 °С           | 101,4 кПа | 1,7      |

|     |                                                                    |                   |         |           |     |
|-----|--------------------------------------------------------------------|-------------------|---------|-----------|-----|
| 9.  | Оксид углерода CO                                                  | 15 м <sup>3</sup> | 1300 К  | 1 ат      | 1,8 |
| 10. | Алюминий                                                           | 1 кг              | 2800 К  | 95 кПа    | 1,6 |
| 11. | Бутилен C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>                              | 10 м <sup>3</sup> | 80 °С   | 101,4 кПа | 1,7 |
| 12. | Этан C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>                                 | 1 м <sup>3</sup>  | 10 °С   | 101,3 кПа | 2,6 |
| 13. | Сера                                                               | 1 кг              | 1200 К  | 98 кПа    | 1,8 |
| 14. | Пропилен C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>                             | 8 м <sup>3</sup>  | 0 °С    | 101,3 кПа | 2,0 |
| 15. | Сероуглерод CS <sub>2</sub>                                        | 1 кг              | 930 °С  | 97000 Па  | 1,6 |
| 16. | Магний                                                             | 1 кг              | 2800 К  | 95000 Па  | 1,6 |
| 17. | Этанол C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ОН                            | 1 кг              | 100 °С  | 102 кПа   | 2,4 |
| 18. | Гексан C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>                              | 5 кг              | 500 °С  | 1,3 ат    | 1,4 |
| 19. | Диэтиловый эфир<br>(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> O | 2 кг              | 1500 К  | 101400 Па | 2,5 |
| 20. | Углерод С                                                          | 10 кг             | 1000 °С | 99 кПа    | 1,8 |

### ЗАДАЧА 8 (пределы воспламенения газовых смесей)

В цехе из-за разгерметизации оборудования образовалась смесь горючего газа с воздухом при атмосферном давлении  $P = 738$  мм рт.ст. Остальные данные приведены в табл. Рассчитать объемную концентрацию горючего газа в воздухе и определить взрывоопасной ли получилась смесь, если считать, что она равномерно распределилась по всему свободному объему помещения? Значение коэффициента, учитывающего, что часть объема помещения занята оборудованием, принять равным 0,8. Пределы воспламенения газов в воздушной смеси см. табл ПЗ Приложения.

| Вариант | Горючий газ                            | Масса газа, кг | Температура воздуха, °С | Размеры помещения, м |
|---------|----------------------------------------|----------------|-------------------------|----------------------|
| 1       | Толуол C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>   | 5              | 20                      | 20x8x4               |
| 2       | Ацетилен C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 50             | 22                      | 20x8x5               |
| 3       | Водород H <sub>2</sub>                 | 90             | 30                      | 150x24x12            |
| 4       | н-Бутан C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 100            | 19                      | 20x10x4              |
| 5       | Метан CH <sub>4</sub>                  | 30             | 20                      | 30x10x6              |
| 6       | Сероводород H <sub>2</sub> S           | 80             | 17                      | 90x40x12             |
| 7       | Оксид углерода CO                      | 200            | 25                      | 80x30x8              |
| 8       | Ацетон C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O | 60             | 20                      | 60x24x7              |

|    |                                  |     |    |           |
|----|----------------------------------|-----|----|-----------|
| 9  | Дихлорэтан $C_2H_4Cl_2$          | 30  | 19 | 30x24x7   |
| 10 | Аммиак $NH_3$                    | 180 | 21 | 90x20x6   |
| 11 | Изопропиловый спирт<br>$C_3H_8O$ | 90  | 18 | 90x30x8   |
| 12 | Этанол $C_2H_5OH$                | 20  | 20 | 10x8x4    |
| 13 | Этилен $C_2H_4$                  | 45  | 19 | 100x20x9  |
| 14 | Толуол $C_7H_8$                  | 9   | 21 | 50x8x4    |
| 15 | Ацетилен $C_2H_2$                | 150 | 18 | 80x20x10  |
| 16 | Водород $H_2$                    | 150 | 23 | 150x24x12 |
| 17 | н-Бутан $C_4H_{10}$              | 60  | 20 | 20x10x4   |
| 18 | Метан $CH_4$                     | 50  | 10 | 40x10x7   |
| 19 | Сероводород $H_2S$               | 100 | 20 | 90x50x12  |
| 20 | Оксид углерода CO                | 180 | 23 | 80x36x10  |

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ. ТЕСТЫ

### *Контрольные вопросы*

1. Дайте определение понятиям "химическая промышленность", "химическое производство". Назовите основные функциональные элементы химического производства, объясните их назначение.
2. Что является сырьем в химическом производстве, каковы его источники?
3. Перечислите основные проблемы химической промышленности.
4. Назовите пути развития современного химического производства.
5. Дайте определение понятию "химическая технология". Какие признаки научной дисциплины имеет химическая технология? В чем отличие химической технологии как науки от теоретической химии?
6. Дайте определение химико-технологического процесса. Приведите примеры ХТП. По каким признакам могут быть классифицированы ХТП?
7. Какие основные законы физики и химии используются в расчетах ХТП? В чем заключается суть этих законов?
8. Перечислите технологические критерии эффективности химико-технологического процесса и химического производства. Дайте их определения, запишите формулы, укажите единицы измерения.
9. Перечислите социальные, экономические и эксплуатационные критерии эффективности химико-технологического процесса. Дайте их определения.
10. Приведите примеры производств, относящихся к технологии неорганических и органических веществ.
11. Сформулируйте основные газовые законы, запишите их математическое выражение:  
а) закон Бойля-Мариотта; б) закон Гей-Люссака; в) закон Шарля; г) объединенный газовый закон.
12. Какое состояние газов называют идеальным? Приведите примеры газов, соответствующих такому состоянию. Какие газы называются реальными?
13. Сформулируйте законы Авогадро, Дальтона, аддитивности. Запишите их математические выражения.
14. Запишите уравнение Менделеева-Клапейрона, укажите размерности входящих в него величин.
15. Как рассчитать массовое и объемное содержание компонентов в смеси?
16. Как рассчитать среднюю молярную массу газовой смеси?
17. Что означает выражение «Реагенты взяты в стехиометрическом соотношении»? Приведите примеры.
18. С какой целью при проведении химических процессов в промышленных условиях один из реагентов берут в избытке по отношению к стехиометрии реакции?

19. Дайте определение понятию "степень превращения вещества". Каким образом можно выразить количество реагента в реагирующей смеси через его степень превращения?
20. Дайте определение понятию "топливо". Основные требования, предъявляемые к топливу.
21. По каким признакам классифицируется топливо? Приведите примеры.
22. Дайте характеристику топлива по ряду углефикации. Укажите примерное содержание основных элементов в различных видах топлива. Дайте характеристику элементного состава топлива (C, H, S, O, N).
23. Что представляют собой минеральные примеси и зола топлива? Как классифицируются минеральные примеси?
24. Внешняя и внутренняя влага топлива.
25. Сущность процесса горения. Условия, необходимые для горения. Полное и неполное горение.
26. Чем отличается низшая теплота горения от высшей? В каких случаях они используются?
27. Как можно рассчитать низшую теплоту сгорания конденсированных систем (смесей известного элементного состава)?
28. Как можно рассчитать низшую теплоту сгорания горючих газов?
29. Принцип расчета теоретического объема воздуха, необходимого для горения индивидуального вещества.
30. Принцип расчета теоретического и практического объема воздуха, необходимого для горения смеси газов.
31. Взрывоопасность топлива. Общие закономерности.
32. Нижний и верхний концентрационные пределы взрываемости (воспламенения). Область воспламенения.
33. Физическая величина. Ее единица (измерения), размер и значение. Привести примеры.
34. Системы единиц. Система СИ. Основные единицы физических величин системы СИ.
35. Производные единицы системы СИ. Примеры. Математическое выражение для производной единицы измерения. Примеры.
36. Типы величин, применяющихся в теххимических расчетах, их соотношение с единицами системы СИ. Какую размерность имеют удельный объем и плотность вещества в системе СИ?
37. Размерность физической величины. Как она определяется? Какие величины называют безразмерными? Приведите примеры.
38. Внесистемные единицы СИ. В каких случаях они используются? Примеры.
39. Дайте определение кратных и дольных единиц. Приведите примеры.
40. Как можно проверить правильность физических формул или правильность единиц измерения величин, подставляемых в формулу?

41. Значащие цифры. Правила округления результатов вычислений.
42. Обращения с нулями. Значимость и не значимость нулей в числах.
43. Чем определяется значимость суммы или разности чисел? Приведите примеры.
44. Чем определяется значимость произведения или частного? Приведите примеры.
45. Недостоверность результата возведения числа в степень или извлечения из числа корня. Приведите примеры.

### *Тесты*

1. Химическая технология – это:
- а) отрасль промышленности;
  - б) наука;
  - в) способ производства;
  - г) метод переработки веществ.
2. Объектом исследования химической технологии является:
- а) химическое производство
  - б) кинетика химических реакций
  - в) основные процессы химического производства
  - г) термодинамика химических реакций.
3. ХТП включает следующие основные процессы:
- а) химические и физико-химические;
  - б) теплообменные и массообменные;
  - в) механические и гидромеханические;
  - г) управления.
4. Природный материал, используемый в химической технологии называют:
- а) побочным продуктом
  - б) исходным сырьем
  - в) промежуточным продуктом
  - г) целевым продуктом
  - д) отходом.
5. Отходы производства и потребления, применяемые в качестве основного или вспомогательного сырья для выпуска целевой продукции, относятся к следующим видам материальных ресурсов:
- а) вторичные;
  - б) основные;
  - в) исходные;
  - г) первичные.
6. Какие разделы входят в технологию органических веществ

- а) переработка нефти и газа
- б) ядерно-химическая технология
- в) силикатные производства
- г) металлургия

7. Какой показатель химического производства относится к техническим:

- а) выход продукта
- б) надежность
- в) себестоимость
- г) управляемость
- д) экологическая безопасность.

8. Выражение для расчета производительности ( $t$  – время)

- а)  $\Pi = G \cdot t$
- б)  $\Pi = Gt$
- в)  $\Pi = G/t$
- г)  $\Pi = G + t$
- д)  $\Pi = t / G$

9. К продуктам основного органического синтеза **не** относятся

- а) бутадиен
- б) спирты
- г) азотная кислота
- д) формальдегид

10. Отношение реально полученного количества продукта к максимально возможному его количеству, которое могло бы быть получено при данных условиях протекания химической реакции характеризует:

- а) конверсию;
- б) селективность;
- в) выход продукта;
- г) активность катализатора.

11. Выражение для интенсивности  $I$  аппарата ( $\Pi$ - производительность,  $G$  – количество продукта,  $V$  – объем аппарата,  $t$  – время):

- |                          |                              |
|--------------------------|------------------------------|
| а) $I = \frac{\Pi}{V}$   | г) $I = \frac{G \cdot t}{V}$ |
| б) $I = \frac{G}{V + t}$ | д) $I = \frac{V}{\Pi}$       |
| в) $I = \Pi \cdot V$     |                              |

12. Что выражает уравнение  $x_A = (n_{A0} - n_A) / n_{A0}$

- а) селективность
- б) степень превращения
- в) концентрацию компонентов
- г) выход продукта.

13. К типовым процессам химической технологии относится

- а) абсорбция
- б) галогенирование
- в) фильтрование
- г) кристаллизация
- д) центрифугирование.

14. Чему равно «нормальное» атмосферное давление?

- а)  $1,013 \cdot 10^3$  Па
- б)  $1,013 \cdot 10^4$  Па
- в)  $1,013 \cdot 10^2$  кПа
- г) 1,013 МПа

15. Какая формула получится, если в уравнении Менделеева-Клапейрона  $pV = (m/M) \cdot R \cdot T$ , заменить массу и объем на плотность?

- а)  $p = (M/\rho) \cdot R \cdot T$
- б)  $p = (\rho/M) \cdot R \cdot T$
- в)  $p = \rho / (M \cdot R \cdot T)$
- г)  $p = (R/M) \cdot \rho \cdot T$

16. Каким законом описывается изохорный процесс?

- а) Гей – Люссака
- б) Шарля
- в) Бойля – Мариотта
- г) Менделеева- Клапейрона

17. Каким законом описывается изобарный процесс?

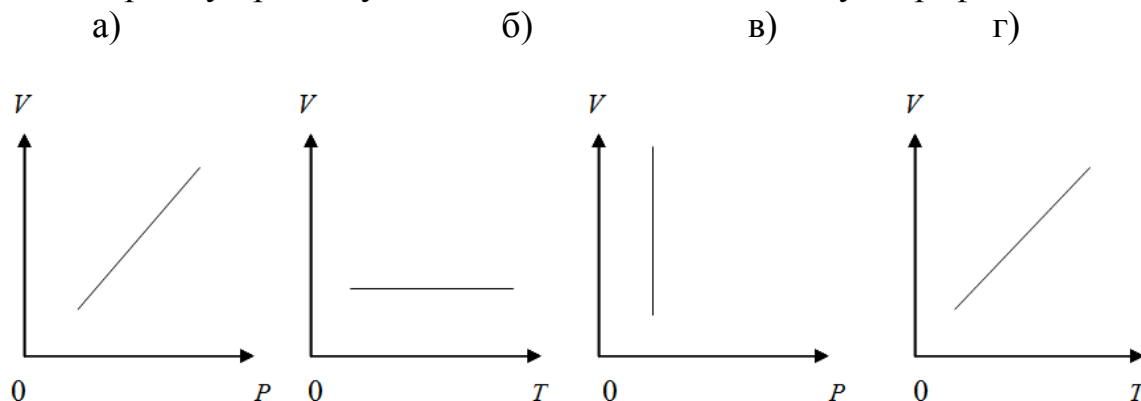
- а) Гей – Люссака
- б) Шарля
- в) Бойля – Мариотта
- г) Менделеева- Клапейрона

18. Как изменится давление в закрытом сосуде при возрастании температуры от 273 до 546К:

- а) увеличится вдвое
- б) останется неизменным
- в) уменьшится

г) уменьшится вдвое

19. Изохорному процессу в идеальном газе соответствует график:



20. Число  $6,02 \cdot 10^{23}$  это

- а) универсальная газовая постоянная
- б) число Авогадро
- в) постоянная Больцмана
- г) постоянная Фарадея
- д) молярный объем идеального газа (при н.у.)

21. Стехиометрическое уравнение химического превращения показывает:

- а) направление химических превращений;
- б) тип химического взаимодействия реагирующих веществ;
- в) соотношение количества веществ, вступающих в химическое взаимодействие;
- г) механизм реакции.

22. Концентрационные пределы воспламенения с повышением температуры смеси:

- а) расширяются
- б) не изменяются
- в) сужаются
- г) зависит от качественного состава смеси

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

- а) эндотермической химической реакцией

- б) горением
- в) взрывом
- г) тлением

24. Кислород, азотная кислота, пероксиды, нитросоединения чаще всего выступают в реакции горения в качестве:

- а) окислителя
- б) горючего вещества
- в) источника воспламенения
- г) восстановителя

25. Коэффициент избытка воздуха при горении показывает

- а) количество кислорода в воздухе
- б) содержание азота в воздухе
- в) во сколько раз в зону горения поступает воздуха больше, чем теоретически необходимое количество для полного сгорания вещества
- г) какое количество воздуха необходимо для полного сгорания вещества
- д) какое количество продуктов сгорания выделяется в зоне горения

26. Что является внешним балластом топлива

- а) сера, углерод, водород
- б) влага, кислород, азот
- в) влага, минеральные примеси
- г) кислород, азот

27. Как изменяется содержание углерода, кислорода и азота в ряду

*древесина → торф → бурый уголь → каменный уголь → антрацит.*

- а) углерода увеличивается, кислорода уменьшается, азота почти не изменяется
- б) углерода уменьшается, кислорода и азота увеличивается
- в) углерода и кислорода увеличивается, азота почти не изменяется
- г) углерода и кислорода уменьшается, азота почти не изменяется
- д) углерода, кислорода и азота увеличивается

28. Характеристикой топлива является

- а) выход по току
- б) селективность

- в) теплота плавления
- г) теплота сгорания
- д) водородный показатель

29. Балластом горючей части твердого топлива является

- а) водород
- б) азот
- в) углерод
- г) сера

30. Нефть — это смесь, состоящая

- а) только из жидких углеводородов
- б) только из газообразных углеводородов
- в) только из твердых углеводородов
- г) из жидких и растворенных в них газообразных и твердых углеводородов

31. Укажите физический способ переработки нефти

- а) риформинг
- б) фракционная перегонка
- в) каталитический крекинг
- г) термический крекинг

32. К конечным продуктам улавливания и разделения прямого коксового газа не относится

- а) каменноугольная смола
- б) сырой бензол
- в) бензин
- г) сульфат аммония
- д) обратный коксовый газ

33. Пиролиз - это

- а) процесс нагревания твердого топлива без доступа воздуха с целью получения из него твердых, жидких и газообразных продуктов различного назначения
- б) процесс расщепления сложных органических веществ, входящих в состав угля, и присоединения водорода к продуктам распада с образованием жидких углеводородов

в) процесс преобразования органической части твёрдого или жидкого топлива в горючие газы при высокотемпературном (1000—2000 °С) нагреве с окислителем

г) процесс интенсивного полного окисления соединений горючей части топлива кислородом, сопровождающийся максимальным выделением тепла и получением продуктов полного окисления – дымовых (негорючих) газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и др.) и твердого негорючего остатка – золы и шлаков.

## ПРИМЕРНЫЕ ТЕМЫ РЕФЕРАТОВ И ПРЕЗЕНТАЦИЙ

1. Комплексное использование сырья в промышленности
2. Импортозамещение в потреблении химической продукции
3. Воздух и вода как сырье химической промышленности
4. Рациональное использование энергии в химическом производстве
5. Безотходная технология как актуальная проблема химической технологии
6. Ключевые проблемы химической промышленности и пути их решения
7. Перспективы развития промышленности природных энергоносителей
8. Современное состояние химической промышленности
9. Современное состояние угольной промышленности
10. Прогнозы развития химической отрасли.
11. Происхождение и состав торфа.
12. Различные теории происхождения нефти. Работы Д.И. Менделеева о технологии переработки нефти
13. Важнейшие нефтепродукты (моторные топлива, смазочные масла и др.). Получение, характеристика.
14. Автомобильные бензины и реактивные топлива. Получение, характеристика.
15. Дизельные и котельные топлива. Получение, характеристика.
16. Теории происхождения природного газа
17. Аллотропные модификации углерода
18. Особо чистые графиты для синтеза алмазов.
19. Углекислота. Переработка угля в нетопливные продукты.
20. Углеродные материалы (сажа, графитовое волокно. Электроды, электроугольные изделия)
21. Углеродные сорбенты и их свойства
22. Углеродные волокна и композиционные материалы на их основе
23. Переработка угля методом пиролиза.
24. Переработка угля методом газификации.
25. Переработка угля методом гидрогенизации.
26. Продукты коксохимического производства. Методы исследования.
27. Продукты основного органического синтеза
28. Искусственное жидкое топливо и био-топливо
29. Синтез Фишера-Тропша и его продукты
30. Применение катализаторов в промышленности
31. Производство кислот в России.
32. Сырье и продукты силикатной промышленности.
33. Высокомолекулярные соединения и способы их получения
34. Производство синтетических моющих средств

35. Производство пестицидов и химических средств защиты растений
36. Производство лакокрасочных материалов.
37. Сырье и продукты металлургической промышленности
38. Основные направления развития современного коксохимического производства
39. Роль кокса в металлургии
40. Экология коксо- и нефтехимического производства
41. Экологические проблемы промышленных объектов г. Магнитогорска
42. Крупнейшие предприятия по производству химических продуктов в России.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

На сегодняшний момент традиционными странами-лидерами мировой химической промышленности являются США, Германия и Япония. Россия пока существенно отстает от них по ключевым показателям производства и потребления продукции химического комплекса. В связи с этим, необходимо государственное стимулирование развития выпуска химической продукции и смещение фокуса в поставках сырья с экспортных направлений на внутренний рынок для последующей переработки на территории России.

В настоящее время в России химическая промышленность является растущей отраслью экономики. Главное направление ее развития состоит не в модернизации и структурной перестройке производства в традиционном понимании, а в переходе на новые технологические принципы, позволяющие преобразовать сырьевую базу, методы осуществления и компьютерного моделирования химического процесса, снять возрастающие противоречия между ресурсными возможностями и ресурсоемкостью производства.

Выпускникам по направлению "Химическая технология" необходимо осознать социальную значимость своей будущей профессии, поскольку именно им предстоит активно включиться в процесс перехода отрасли на новые технологические принципы и участвовать в процессе существенного повышения конкурентоспособности российского химического комплекса в целом и каждого из его сегментов в отдельности на мировом рынке.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Приказ Министерства промышленности и торговли РФ и Министерства энергетики РФ от 14 января 2016 г. № 33/11 “О внесении изменений в Стратегию развития химического и нефтехимического комплекса на период до 2030 года” - Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71224670/>.
2. Химическая технология [Текст]: Учебно-методическое пособие / Атманских И.Н., Нохрин С.С., Шарафутдинов А.Р., - 2-е изд., стер. - М.: Флинта, Изд-во Урал. ун-та, 2017. - 120 с.
3. Бесков В.С. Общая химическая технология [Текст]: Учебник для вузов./В.С. Бесков .- М.: ИКЦ «Академкнига», 2005.-452с. 6 ил., табл.- ISBN 5-94628-150-X.
4. Общая химическая технология [Текст]: Учебник для техн. вузов / А.М. Кутепов, Т.И. Бондарева, М.Г. Беренгартен. М.: Академкнига, 2004.-528с.: ил. — ISBN 5-94628-079-1.
5. Теоретические основы химической технологии [Текст]: учеб. пособие /А.Н. Смирнов, С.А. Крылова, В.И. Сысоев. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. 61 с.
6. Теоретические основы химико-технологических процессов [Электронный ресурс]: учеб. пособие/ Смирнов А.Н., Крылова С.А., Сысоев В.И. - ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». – Электрон.текстовые дан.(2,81Мб). -Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2018. - 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Загл. с титул.экрана.
7. Ильин, А.П. Современные проблемы химической технологии неорганических веществ: учеб. пособие / А.П. Ильин, А.А. Ильин; Иван. гос. хим.- технол. ун-т. – Иваново, 2011. 133 с.
8. Крылова, С.А. Производство водорода [Электронный ресурс]: учеб. пособие/ - ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова». – Электрон.текстовые дан. - Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2015. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с титул.экрана.
9. Производство химических продуктов. Часть 1 [Электронный ресурс]: учеб. пособие/ Смирнов А.Н., Крылова С.А., Сысоев В.И. - ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». – Электрон.текстовые дан.(3,15Мб). -Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2018. - 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Загл. с титул.экрана.
10. Игнатенков В.И. Примеры и задачи по общей химической технологии [Текст]: Учебное пособие для вузов./ Игнатенков В.И., Бесков В.С.- М.: ИКЦ «Академкнига», 2005.- 198 с. : ил.- ISBN 5-94628-130-5.
11. Общая химическая технология [Текст]: учеб. пособие / С.А Крылова, Р.Н. Абдрахманов, И.В. Понурко. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. 87 с.

12. Общая химическая технология [Электронный ресурс]: учеб. пособие/Крылова С.А., Понурко И.В., Абдрахманов Р.Н. - ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». -Электрон.текстовые дан.(1,45 Мб). -Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2017. -1 электрон. опт. диск (CD-R). -Загл. с титул.экрана.
13. Расчет состояния элементов химико-технологических систем [Электронный ресурс]: учебное пособие/С. А. Крылова, З. И. Костина, И. В. Понурко, А. В. Горохов; МГТУ. -Магнитогорск: МГТУ, 2014. -1 электрон. опт. диск (CD-ROM). -Загл. с титул.экрана.
14. Материальные и тепловые расчеты химико-технологических процессов [Текст]: учеб. пособие / С.А Крылова, З.И. Костина, И.В. Понурко, А.В. Горохов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011.-52 с.
15. Глубокая переработка бурых углей с получением жидких топлив и углеродных материалов: Монография / Кузнецов Б.Н., Грицко Г.И. -Новосиб.:СО РАН, 2012. - 212 с. ISBN 978-5-7692-1258-1
16. Копытов, В.В. Газификация конденсированных топлив: ретроспективный обзор, современное состояние дел и перспективы развития [Электронный ресурс] / В.В. Копытов. – М.: Инфра-Инженерия, 2015. – 504 с. - ISBN 978-5-9729-0052-7
17. Волова Т. и др. Фундаментальные основы комплексной переработки углей КАТЭКа для получения энергии, синтез-газа и новых материалов с заданными свойствами. – Litres, 2017.
18. Анализ перспектив конверсии угля в нетопливные продукты в условиях российского рынка [Текст]: отчет о НИР (промежуточ.) : Центр кластерного развития ОАО «Кузбасский технопарк»; рук. Рада А. О.; исполн.: Тулупова Т. В. – К.,2016. – 121 с. - ISBN 978-5-904496-27-2.
19. Краткий справочник физико-химических величин, Изд. 10-е / Под ред. А. А. Равделя и А. М. Понаморевой. – С-Пб.: Химия, 2003. – 240 с.
20. Карауш, С.А. Теория горения и взрыва: учеб. для студ.учреждений высш.проф. образования / С.А. Карауш. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 208 с.
21. Карауш, С.А. Расчет параметров процессов горения [Текст]: учебное пособие / С.А. Карауш. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2015. 120 с.
22. Горение органического топлива: Учебное пособие / А.А. Кудинов. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 390 с.: 60х90 1/16. - (Высшее образование: Бакалавриат). (переплет) ISBN 978-5-16-009439-7, 300 экз.
23. Смирнов, А. Н. Термодинамика процессов горения топлива [Электронный ресурс]: методические указания для студентов по дисциплине "Физическая химия металлургических процессов" / А. Н. Смирнов, М. А. Шестобитов, С. В. Юдина ; МГТУ. - Магнитогорск : МГТУ, 2013. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). -Загл. с титул.экрана.

# ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1

Плотность растворов серной кислоты (20<sup>0</sup>С)

| Содержание,<br>% масс.<br>H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | Плотность,<br>кг/м <sup>3</sup> | Содержание,<br>% масс.<br>H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | Плотность,<br>кг/м <sup>3</sup> | Содержание,<br>% масс.<br>H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | Плотность,<br>кг/м <sup>3</sup> |
|----------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 1                                                        | 1004,9                          | 35                                                       | 1259,9                          | 68                                                       | 1587,4                          |
| 2                                                        | 1011,6                          | 36                                                       | 1268,4                          | 69                                                       | 1598,9                          |
| 3                                                        | 1018,3                          | 37                                                       | 1276,9                          | 70                                                       | 1610,5                          |
| 4                                                        | 1025,0                          | 38                                                       | 1285,5                          | 71                                                       | 1622,1                          |
| 5                                                        | 1034,7                          | 39                                                       | 1294,1                          | 72                                                       | 1633,8                          |
| 6                                                        | 1038,5                          | 40                                                       | 1302,8                          | 73                                                       | 1645,6                          |
| 7                                                        | 1045,3                          | 41                                                       | 1311,6                          | 74                                                       | 1657,4                          |
| 8                                                        | 1052,2                          | 42                                                       | 1320,5                          | 75                                                       | 1669,2                          |
| 9                                                        | 1059,1                          | 43                                                       | 1329,4                          | 76                                                       | 1681,0                          |
| 10                                                       | 1066,1                          | 44                                                       | 1338,4                          | 77                                                       | 1692,7                          |
| 11                                                       | 1073,1                          | 45                                                       | 1347,6                          | 78                                                       | 1704,3                          |
| 12                                                       | 1080,2                          | 46                                                       | 1356,9                          | 79                                                       | 1715,8                          |
| 13                                                       | 1087,4                          | 47                                                       | 1366,3                          | 80                                                       | 1727,2                          |
| 14                                                       | 1094,7                          | 48                                                       | 1375,8                          | 81                                                       | 1738,3                          |
| 15                                                       | 1102,0                          | 49                                                       | 1385,4                          | 82                                                       | 1749,1                          |
| 16                                                       | 1109,4                          | 50                                                       | 1395,1                          | 83                                                       | 1759,4                          |
| 17                                                       | 1116,8                          | 51                                                       | 1404,9                          | 84                                                       | 1769,3                          |
| 18                                                       | 1124,3                          | 52                                                       | 1414,8                          | 85                                                       | 1778,6                          |
| 19                                                       | 1131,8                          | 53                                                       | 1424,8                          | 86                                                       | 1787,2                          |
| 20                                                       | 1139,4                          | 54                                                       | 1435,0                          | 87                                                       | 1795,1                          |
| 21                                                       | 1147,1                          | 55                                                       | 1445,3                          | 88                                                       | 1802,2                          |
| 22                                                       | 1154,8                          | 56                                                       | 1455,7                          | 89                                                       | 1808,7                          |
| 23                                                       | 1162,6                          | 57                                                       | 1466,2                          | 90                                                       | 1814,4                          |
| 24                                                       | 1170,4                          | 58                                                       | 1476,8                          | 91                                                       | 1819,5                          |
| 25                                                       | 1178,3                          | 59                                                       | 1487,5                          | 92                                                       | 1824,0                          |
| 26                                                       | 1186,2                          | 60                                                       | 1498,3                          | 93                                                       | 1827,9                          |
| 27                                                       | 1194,2                          | 61                                                       | 1509,1                          | 94                                                       | 1831,2                          |
| 28                                                       | 1202,3                          | 62                                                       | 1520,0                          | 95                                                       | 1833,7                          |
| 29                                                       | 1210,4                          | 63                                                       | 1531,0                          | 96                                                       | 1835,5                          |
| 30                                                       | 1218,5                          | 64                                                       | 1542,1                          | 97                                                       | 1836,3                          |
| 31                                                       | 1226,7                          | 65                                                       | 1553,3                          | 98                                                       | 1836,5                          |
| 32                                                       | 1234,9                          | 66                                                       | 1564,6                          | 99                                                       | 1834,2                          |
| 33                                                       | 1243,2                          | 67                                                       | 1576,0                          | 100                                                      | 1830,5                          |

Плотность растворов азотной кислоты (20<sup>0</sup>С)

| Содержание,<br>% масс.<br>HNO <sub>3</sub> | Плотность,<br>кг/м <sup>3</sup> | Содержание,<br>% масс.<br>HNO <sub>3</sub> | Плотность,<br>кг/м <sup>3</sup> | Содержание,<br>% масс.<br>HNO <sub>3</sub> | Плотность,<br>кг/м <sup>3</sup> |
|--------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------|
| 0,3296                                     | 1,000                           | 23,94                                      | 1,140                           | 45,27                                      | 1,280                           |
| 1,255                                      | 1,005                           | 24,71                                      | 1,145                           | 46,06                                      | 1,285                           |
| 2,164                                      | 1,010                           | 25,48                                      | 1,150                           | 46,85                                      | 1,290                           |
| 3,073                                      | 1,015                           | 26,24                                      | 1,155                           | 47,63                                      | 1,295                           |
| 3,982                                      | 1,020                           | 27,00                                      | 1,160                           | 48,42                                      | 1,300                           |
| 4,883                                      | 1,025                           | 27,26                                      | 1,165                           | 49,21                                      | 1,305                           |
| 5,784                                      | 1,030                           | 28,51                                      | 1,170                           | 50,00                                      | 1,310                           |
| 6,661                                      | 1,035                           | 29,25                                      | 1,175                           | 50,85                                      | 1,315                           |
| 7,530                                      | 1,040                           | 30,00                                      | 1,180                           | 51,71                                      | 1,320                           |
| 8,398                                      | 1,045                           | 30,74                                      | 1,185                           | 52,56                                      | 1,325                           |
| 9,259                                      | 1,050                           | 31,47                                      | 1,190                           | 53,41                                      | 1,330                           |
| 10,12                                      | 1,055                           | 32,21                                      | 1,195                           | 54,27                                      | 1,335                           |
| 10,97                                      | 1,060                           | 32,94                                      | 1,200                           | 55,13                                      | 1,340                           |
| 11,81                                      | 1,065                           | 33,68                                      | 1,205                           | 56,04                                      | 1,345                           |
| 12,65                                      | 1,070                           | 34,41                                      | 1,210                           | 56,95                                      | 1,350                           |
| 13,48                                      | 1,075                           | 35,16                                      | 1,215                           | 57,87                                      | 1,355                           |
| 14,31                                      | 1,080                           | 35,93                                      | 1,220                           | 58,78                                      | 1,360                           |
| 15,13                                      | 1,085                           | 36,70                                      | 1,225                           | 59,69                                      | 1,365                           |
| 15,95                                      | 1,090                           | 37,48                                      | 1,230                           | 60,67                                      | 1,370                           |
| 16,76                                      | 1,095                           | 38,25                                      | 1,235                           | 61,69                                      | 1,375                           |
| 17,58                                      | 1,100                           | 39,02                                      | 1,240                           | 62,70                                      | 1,380                           |
| 18,39                                      | 1,105                           | 39,80                                      | 1,245                           | 63,72                                      | 1,385                           |
| 19,19                                      | 1,110                           | 40,58                                      | 1,250                           | 64,74                                      | 1,390                           |
| 20,00                                      | 1,115                           | 41,36                                      | 1,255                           | 65,84                                      | 1,395                           |
| 20,79                                      | 1,120                           | 42,14                                      | 1,260                           | 66,97                                      | 1,400                           |
| 21,59                                      | 1,125                           | 42,92                                      | 1,265                           | 68,10                                      | 1,405                           |
| 22,38                                      | 1,130                           | 43,70                                      | 1,270                           | 69,23                                      | 1,410                           |
| 23,16                                      | 1,135                           | 44,48                                      | 1,275                           | 70,34                                      | 1,415                           |

Пределы воспламенения газов в воздушных смесях при атмосферном давлении  
и температуре 20 °С

| Горючий газ                                        | Концентрационные пределы<br>воспламенения, об.% |         |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------|
|                                                    | Нижний                                          | Верхний |
| Аммиак $\text{NH}_3$                               | 15                                              | 28      |
| Ацетилен $\text{C}_2\text{H}_2$                    | 2,3                                             | 81      |
| Ацетон $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$              | 2,2                                             | 13      |
| Водород $\text{H}_2$                               | 4,1                                             | 96      |
| Дихлорэтан $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$       | 6,2                                             | 16,0    |
| Изопропиловый спирт $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ | 2,0                                             | 12,0    |
| Метан $\text{CH}_4$                                | 5,0                                             | 15,0    |
| н-Бутан $\text{C}_4\text{H}_{10}$                  | 1,8                                             | 9,1     |
| Оксид углерода $\text{CO}$                         | 12,5                                            | 74,2    |
| Сероводород $\text{H}_2\text{S}$                   | 4,3                                             | 46,0    |
| Толуол $\text{C}_7\text{H}_8$                      | 1,3                                             | 6,0     |
| Этанол $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$             | 3,6                                             | 19,0    |
| Этилен $\text{C}_2\text{H}_4$                      | 3,0                                             | 32,0    |
| Бензин                                             | 0,8                                             | 5,2     |
| Керосин                                            | 1,4                                             | 7,5     |
| Бензол                                             | 1,4                                             | 7,1     |
| Пропан                                             | 2,4                                             | 9,5     |
| Пентан                                             | 1,4                                             | 7,8     |

Учебное текстовое электронное издание

**Крылова Светлана Александровна  
Понурко Ирина Витальевна**

**ВВЕДЕНИЕ В НАПРАВЛЕНИЕ  
«ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ»**

Практикум

1,58 Мб

1 электрон. опт. диск

г. Магнитогорск, 2019 год  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»  
Адрес: 455000, Россия, Челябинская область, г. Магнитогорск,  
пр. Ленина 38

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова»  
Кафедра металлургии и химических технологий  
Центр электронных образовательных ресурсов и  
дистанционных образовательных технологий  
e-mail: ceor\_dot@mail.ru