

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
Глава 1 Физико-химические и теплофизические свойства газов	9
1.1 Физическое (агрегатное) состояние вещества	10
1.2 Физико-химические свойства газов и их смесей	16
1.3 Термодинамические диаграммы состояния	20
1.4 Температурно-энтропийная диаграмма состояния вещества	23
1.5 Теплофизические свойства газов и их определение	24
1.6 Критические и псевдокритические свойства	29
1.7 Изображение хода термодинамических процессов и их расчет с помощью T-S диаграммы	31
Глава 2 Теоретические основы процессов разделения газовых смесей	35
2.1 Назначение и методы разделения газовых смесей	35
2.2 Конденсационные методы разделения газов	38
2.3 Сорбционные методы осушки и разделения газов	41
2.3.1 Абсорбционно-десорбционные методы	42
2.3.2 Адсорбционно-десорбционные методы разделения газов	47
2.4 Разделение сжиженных газов ректификацией	49
Глава 3 Основные циклы и схемы установок получения низких температур	60
3.1 Физические основы получения низких температур	60
3.2 Термодинамические основы получения холода	61
3.3 Цикл и схема одноступенчатой холодильной машины	64
3.4 Холодильная установка и цикл двухступенчатого сжатия	67
3.5 Схема и цикл каскадной холодильной установки	69
3.6 Холодильные циклы и установки глубокого охлаждения	72
3.6.1 Простой регенеративный цикл высокого давления	73
3.6.2 Регенеративный цикл дросселирования газа двух давлений	76
3.7 Циклы, сочетающие дросселирование и детандирование сжатого газа	76
3.7.1 Цикл высокого давления с детандером	76
3.7.2 Цикл среднего давления с детандером	78
3.7.3 Регенеративный цикл низкого давления	79
Глава 4 Процессы и схемы воздуходелительных установок (ВРУ)	82
4.1 Характеристика и применение продуктов разделения воздуха в современных технологиях	82
4.2 Назначение и классификация ВРУ	84
4.3 Физические основы процессов разделения воздуха	86
4.4 Разделение жидкого воздуха ректификацией	92
4.5 Принципиальные технологические схемы современных ВРУ	96
4.5.1 Установки высокого давления малой производительности	97
4.5.2 Установки среднего давления	99
4.5.3 Установки низкого давления большой производительности	99
4.6 Выделение из воздуха инертных и редких газов	103
4.6.1 Получение сырого и чистого аргона	104
4.6.2 Получение криптоно-ксенонового концентрата	105
4.6.3 Выделение неона-гелиевой смеси	106
Глава 5 Основное оборудование воздуходелительных установок	108
5.1 Оборудование для очистки и предварительного охлаждения воздуха	108
5.2 Оборудование для осушки и очистки сжатого воздуха	111
5.3 Теплообменное оборудование	113
5.4 Ректификационные колонны	120
5.5 Оборудование для хранения и транспортирования сжиженных газов	124

Глава 6	Процессы и установки подготовки газа к переработке.....	130
6.1	Сырье газоперерабатывающих заводов	130
6.2	Продукты газоперерабатывающих заводов	135
6.3	Основные объекты газоперерабатывающего завода	137
6.4	Установки и оборудование для очистки газов от сопутствующих примесей	140
6.4.1	Блок установок очистки газа от механических примесей	141
6.4.2	Блок установок осушки газов от влаги	143
6.5	Установки очистки от примесей кислых газов	148
6.6	Адсорбционные установки осушки и очистки газа	152
Глава 7	Основные процессы и технологические установки ГПЗ	156
7.1	Способы и установки для отбензинивания газа	156
7.1.1	Компрессионная установка отбензинивания	157
7.1.2	Адсорбционно-десорбционные установки отбензинивания	159
7.1.3	Установка низкотемпературной абсорбции (НТА)	163
7.1.4	Адсорбционно-десорбционные установки отбензинивания	165
7.2	Низкотемпературные методы переработки газов	167
7.2.1	Установка низкотемпературной конденсации	168
7.2.2	Установки отбензинивания газов методами низкотемпературной ректификации	170
7.3	Установка стабилизации конденсата	173
7.4	Газофракционирующие установки	175
7.5	Установки сжижения природного газа	179
Глава 8	Технологическое оборудование газоразделительных установок	184
8.1	Теплообменное оборудование	185
8.1.1	Теплообменники кожухотрубчатые газожидкостные	185
8.1.2	Теплообменники конденсаторы – испарители	191
8.1.3	Пластинчатые теплообменники	195
8.1.4	Аппараты воздушного охлаждения	196
8.2	Расчет и выбор теплообменного оборудования	199
8.3	Колонное массообменное оборудование	203
8.3.1	Адсорбционные колонны	204
8.3.2	Ректификационные колонны	210
8.4	Расчет колонного массообменного оборудования	219
Глава 9	Установки выделения гелия из гелийсодержащих газов	221
9.1	Применение гелия в науке и технике	221
9.2	Способы извлечения гелия из газовых смесей	222
9.3	Установки для извлечения гелия из природного газа	224
9.4	Выделение гелия из продувочных газов.....	228
9.5	Установка очистки гелия-сырца	230
Глава 10	Установки выделения водорода из водородсодержащих газов	232
10.1	Промышленные способы производства водорода	233
10.2	Устройство и принцип работы трубчатых печей установок конверсии природного газа	242
10.3	Методы выделения и очистки водорода	245
10.4	Схемы установок и циклы получения жидкого водорода	248
10.5	Оборудование для хранения и транспортирования жидкого водорода ...	252
	Список литературы	254
	Приложения	257
	Предметный указатель	267

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что агрегатное состояние любого вещества определяется его молекулярным составом и строением, а также термодинамическими параметрами состояния, важнейшими из которых являются температура и давление. Целенаправленно управляя параметрами состояния вещества, газ переводят в жидкость или твердое вещество, минуя жидкое состояние (используя процесс газовой кристаллизации), или твердое соединение переводят в газообразное, минуя жидкое – процесс сублимации. Открытие законов технической термодинамики и использование их в производственных целях позволило в течение короткого времени перевести сначала в жидкое, а затем и в твердое состояние все известные в природе газы, а для некоторых из них, в частности для водорода, предсказать, а затем экспериментально подтвердить приобретение им металлических свойств при высоких давлениях.

Практика всегда была заказчиком исследователям на поиск решений трудной задачи, а потребности практики возрастали по мере удовлетворения предыдущих желаний! Этот путь развития науки и техники, названный научно-техническим прогрессом, позволяет решать сложнейшие практические задачи и осваивать околоземное космическое пространство, а в перспективе позволит совершать межпланетные путешествия.

Не отвлекаясь на оценку научных достижений и открытий, отметим, что качественный скачок в развитии науки и техники произошел тогда, когда впервые (совсем недавно в историческом масштабе – в 1877 г.) удалось перевести в жидкое состояние кислород – один из семи “благородных” газов, до того времени не поддававшихся сжижению. Затем в течение непродолжительного времени был получен жидкий азот, а в течение всего двух десятилетий были построены промышленные установки для производства жидкого воздуха. В 1898 г. Джеймс Дьюар получил жидкий водород, спустя 10 лет Камерлинг-Оннес получил жидкий гелий. Промышленность быстро оценила достижения ученых и, начиная с 1895 г. в Англии, Германии и Соединенных Штатах Америки были созданы мощные промышленные отрасли по разделению газов, в частности по разделению воздуха и получению водорода из водяного пара.

В современный период задача разделения газов и газовых смесей на отдельные компоненты остается весьма актуальной. Успешное ее решение только на основе использования продуктов разделения воздуха позволяет обеспечить химическую промышленность сырьем для производства минеральных удобрений, интенсифицировать металлургиче-

ское производство черных и цветных металлов, а также получать из воздуха инертные газы, используемые во многих современных отраслях промышленности.

Разделение природных и попутных нефтяных газов, а также искусственно полученных газовых смесей на отдельные компоненты позволяет обеспечивать химическую, нефтехимическую и многие другие отрасли промышленности ценным сырьем. Очень актуальной является задача получения больших количеств жидкого водорода как ракетного топлива и газообразного водорода, как эффективного компонента энергохимических комплексов и энергетики будущего.

В связи с тем интересом, который проявляется в промышленности к разделению газовых смесей различного происхождения и химического состава, в данной книге сделана попытка систематизирования теоретических и инженерных основ процессов разделения газовых смесей на отдельные компоненты. Материал в книге систематизирован по степени трудности в познавательном смысле.

В главах 1 и 2 рассмотрены физико-химические и теплофизические свойства газов, а также теоретические основы процессов разделения газовых смесей физико-химическими методами (абсорбции, адсорбции, десорбции и ректификации) и методами криогеники.

В главе 3 описаны основные циклы и схемы установок получения низких температур. В главах 4 и 5 рассмотрены процессы, схемы установок и основное оборудование воздухоразделительных установок.

В главах 6, 7 и 8 рассмотрены основные объекты, процессы, технологические установки и оборудование газоперерабатывающих заводов по переработке природного газа и попутных газов нефтедобычи, по сжижению природного газа.

В главах 9 и 10 представлены схемы установок для выделения гелия и водорода из газовых смесей различного состава.

Книга предназначена в качестве учебного пособия студентам, обучающимся по специальности “Оборудование химических производств и предприятий строительных материалов” со специализацией “Машины и аппараты химических и нефтеперерабатывающих производств”. Ограниченный объем учебного пособия не позволяет более детально осветить весь тот громадный материал, который рассеян во многих книгах и публикациях.

Автор выражает искреннюю признательность и благодарность рецензентам за замечания и ценные советы, высказанные ими при подготовке книги к изданию.

Понимая, что внимательный и взыскательный читатель книги найдет недоработки и погрешности, автор будет признателен читателям за критические замечания, советы и пожелания, направленные на дальнейшее улучшение ее содержания.

В этой главе ...

- ▶ *Основные физико-химические свойства и параметры физического состояния вещества.*
- ▶ *В основе многих технологий – параметры, агрегатное состояние и фазовые переходы веществ.*
- ▶ *Некоторые свойства газов и газовых смесей.*
- ▶ *Диаграммы состояния – ключ к сложным и управляемым процессам.*
- ▶ *Процессы и энергетические эффекты в газожидкостных системах.*

В окружающем нас мире газы природного происхождения являются источником жизни и одним из основных источников энергии, который позволяет обеспечить жизнь на планете Земля на многие миллионы лет.

Самым привычным и доступным для всего живого является воздух – газовая смесь, которую в привычной жизни мы почти не замечаем, но без которой любой живой организм не может жить.

Другим важным источником цивилизованной жизни являются горючие природные и попутные нефтяные газы, благодаря которым сегодня обеспечиваются потребности общества и промышленности источниками энергии и химическими продуктами, ценность которых возрастает при фракционном разделении газовых смесей.

Для дальнейшего существования цивилизации уже недопустимо расточительно использовать подаренные природой запасы воздуха и природных газов, необходимо использовать их более разумно, с большей эффективностью. Эта задача решается в широких промышленных масштабах посредством разделения газовых смесей на отдельные компоненты или обогащенные отдельными компонентами газовые фракции, что позволяет существенно расширить сырьевую базу промышленности, значительно интенсифицировать производственные процессы и синтезировать новые химические продукты и соединения.

Для дальнейшего рассмотрения вопросов, вынесенных в заглавие книги, кратко остановимся на достигнутом уровне знаний о природе веществ и сути происходящих физических и физико-

химических процессов и превращений в окружающей природе и в производственных условиях.

1.1 Физическое (агрегатное) состояние вещества

Наука о веществах и их превращениях зародилась в Древнем Египте за 2000 лет до новой эры. О том, что вещество состоит из мельчайших неделимых частиц – атомов, утверждали задолго до начала новой эры еще философы древнего мира – Аристотель, Архимед, Демокрит, Птолемей и др. Именно они указывали, что агрегатное состояние вещества определяется взаимным расположением между собой этих мельчайших кирпичиков вселенной и их взаимодействиями между собой [28].

С позиций современного уровня знаний вещество – сложная физико-химическая система, которая характеризуется **параметрами состояния** и комплексом свойств, важнейшими из которых являются следующие.

Химический состав – одна из основных конститутивных характеристик вещества, которая определяет его строение, физические и физико-химические свойства. Свойства газовых и жидких многокомпонентных смесей зависят от индивидуальных свойств и концентрации входящих в них компонентов, а также от температуры и давления.

Агрегатное состояние (АС) является важнейшей физико-химической характеристикой вещества и определяется химическим составом и внутренним строением, характером межмолекулярных связей, а также внешними физическими условиями – температурой и давлением [9, 38]. Последние из названных параметров позволяют превратить графит в алмаз, а водороду придать свойства, характерные для металлов. Агрегатное состояние перерабатываемых веществ определяет не только скорость их физико-химического взаимодействия в технологическом процессе, но оказывает влияние на устройство и конструктивные особенности аппарата, его габаритные размеры.

Температура – важнейший технологический параметр состояния, который определяет степень нагрева среды и влияет на скорость взаимодействия фаз, по этому параметру процессы различают низко- и высокотемпературные, протекающие с поглощением тепла – эндотермические или с выделением тепла – экзотермические.

Давление определяет условие равновесия в фазах и величину движущей силы процессов [18, 30, 37], по величине применяемого давления процессы могут происходить под разрежением (вакуумом), при атмосферном или избыточном (повышенном или высоком) давлении.

Объем является количественной мерой измерения состояния индивидуального вещества в рассматриваемой системе при заданных давлении и температуре, тем самым объем является также мерой измерения выполненной работы в данной системе. Для индивидуальных газов параметром состояния также является **удельный объем** – пространство, занимаемое 1 киломодем газа при нормальных условиях (давлении 760 мм рт. ст. и температуре 0°C).

Газ – неконденсируемое агрегатное состояние – характеризуется полным отсутствием порядка во взаимном расположении атомов и молекул, которые совершают хаотические перемещения во всех направлениях. Термин “газ” обязан своим происхождением греческому слову “хаос”, означающему бесформенную массу первичных элементов, из которых, по мнению древних ученых, был создан мир [28].

Характерным свойством газов является **упругость** – способность сжиматься и расширяться под влиянием давления и температуры, и следовательно, эти факторы являются определяющими параметрами состояния газа. Слабое межмолекулярное взаимодействие вещества в газообразном состоянии обуславливает стремление газа к неограниченному расширению с повышением температуры. Весьма важным свойством газов является их способность смешиваться в любых отношениях, образуя при этом однородную – гомогенную смесь.

Повышение давления уменьшает расстояние между частицами, способствуя образованию новых физико-химических связей и приобретению системой новых физических свойств. По мере увеличения давления газа различия в свойствах сжатого газа и жидкости уменьшаются. Пример: сжатие водорода до 1 млн. атм приводит к появлению в нем свойств, характерных для металлов, – достигается упорядоченность атомов в кристаллической решетке и образуется иной механизм явлений переноса.

Повышение температуры приводит к увеличению кинетической энергии молекул и в определенном температурном интервале приводит к разрыву химических связей и к повышению химической активности. При температурах выше 5000°C газ ионизируется и переходит в плазменное состояние (четвертое АС вещества). При понижении температуры уменьшается кинетическая энергия молекул, что способствует переходу от газообразного к жидкому, а затем и к твердому АС.

В отличие от газа **пар** является конденсированным АС и легко переходит в жидкость при незначительных изменениях параметров состояния – понижении температуры или повышении давления.

Параметром, определяющим состояния газа или пара известного вещества при постоянном давлении, является **температура фазо-**

вого перехода – температура конденсации. Если температура пара выше температуры конденсации, то такой пар называют **сухим перегретым**, и его свойства в определенной мере сопоставимы со свойствами идеального газа. Если пар находится в равновесии с жидкостью и имеет с ней одинаковые температуру и давление, то такой пар называют **насыщенным**, если в парах присутствуют даже в небольшом количестве микрокапли жидкости, то такой пар называют **влажным**, и, по существу он, представляет механическую смесь сухого насыщенного пара с некоторым количеством микрокапель жидкости.

Обычно отношение массы микрокапель диспергированной жидкости, находящейся в 1 кг влажного пара, называют **влажностью пара**, а отношение массы сухого пара, находящегося в 1 кг влажного пара, называют **степенью сухости пара**.

Перевод газа (пара) в **сжиженное АС** связано с изменением параметров состояния (понижением температуры и повышением давления), а также со значительными энергетическими затратами.

Жидкость – конденсированное АС вещества, которое обладает рядом индивидуальных свойств. Жидкость характеризуется тем, что молекулы в ней определенным образом упорядочены вблизи друг от друга и в них отсутствует дальняя (решетчатая) упорядоченность молекул, свойственная твердым кристаллическим веществам.

Физические свойства и структура жидкостей зависят от химического строения молекул и характера их взаимодействия между собой. Жидкостям присуще свойство текучести. Жидкость занимает определенный объем, в отличие от газов жидкости мало упругие и следовательно слабо сжимаемые среды. Тепловое движение молекул жидкости включает колебания их около положений равновесия, по мере увеличения температуры амплитуда колебаний возрастает и, наконец, при выходе за пределы действия сил молекулярного притяжения вещество переходит в парообразное состояние.

Для перевода единицы массы вещества из жидкого состояния в парообразное необходимо затратить энергию на преодоление сил взаимного притяжения молекул. Эту энергию называют **удельной теплотой фазового перехода (теплотой испарения)**, при обратном переходе из парового в жидкое состояния эта энергия выделяется в форме **удельной теплоты конденсации (теплоты конденсации)**. При одинаковых условиях (температуре и давлении) удельные теплоты испарения и конденсации равны. С повышением давления удельная теплота фазового перехода практически для всех жидкостей уменьшается.

Твердое агрегатное состояние вещества характеризуется определенной упорядоченной, периодически повторяющейся внутренней

структурой взаимного расположения частиц. В кристаллическом твердом теле частицы строго упорядочены и образуют кристаллическую решетку, параметры которой фиксированы и определяют форму кристаллов и физические свойства вещества. Для кристаллических тел характерной является дальняя упорядоченность частиц кристаллической решетки.

В общем случае форма кристаллов зависит от химического строения вещества, температуры и давления. Свойство кристаллов одинакового химического строения изменять свою форму под влиянием температуры и давления называют **полиморфизмом**, свойство кристаллов различных по химическому составу веществ образовывать кристаллы одинаковой формы называют **изоморфизмом**. Свойство атомов одного и того же вещества образовывать несколько простых веществ называется **аллотропией** (кислород – озон, алмаз – графит – карбин и др.) [28].

Твердые кристаллические вещества имеют фиксированную **температуру плавления** при постоянном давлении, при повышении давления, как правило, повышается температура плавления, а также может изменяться структура кристаллической решетки, соответственно вещество может приобретать другие физические свойства.

По типу частиц, образующих кристаллические решетки, различают ионные, атомные, молекулярные и металлические структуры.

В аморфном твердом теле блоки микрокристаллических частиц расположены хаотически, температура плавления аморфного тела не имеет фиксированного значения. На структуру аморфного тела оказывает большое влияние скорость охлаждения. Вещества аморфной структуры в основном получают при высоких скоростях охлаждения расплавов. При медленном охлаждении, подбирая соответствующие условия, почти все аморфные вещества получают в кристаллическом состоянии.

Большинство газов (азот, водород, кислород и др.), а также пары органических соединений, переходя в твердое состояние, образуют молекулярные кристаллические решетки и характеризуются низкой температурой плавления.

Чистым веществом называют систему, однородную по составу и неизменную в химическом отношении. Переход чистого вещества из одного агрегатного состояния в другое сопровождается определенным тепловым эффектом [46]. Количество тепла, выделяемое при переходе единицы массы вещества из газового или жидкого состояния в твердое, называется **удельной теплотой кристаллизации**, соответственно при обратном переходе из твердого состояния в жидкое (или

газообразное) расходуется **удельная теплота плавления**. Для одного и того же вещества при определенном давлении удельные теплоты фазового перехода численно равны.

Для оценки влияния свойств и параметров состояния на условия существования фаз однокомпонентного чистого вещества построены диаграммы состояния, обычно представляемые в прямоугольной плоской (двухпараметрической) или пространственной объемной (трехпараметрической) системе координат. Например, для трехпараметрической (объемной) диаграммы состояния по оси ординат откладывают значения давления P , по оси абсцисс – мольный объем V , по третьей оси – значения температуры T .

На такой диаграмме можно отразить условия совместного существования фаз в виде некоторой поверхности, называемой полем существования фаз.

Так как пространственные диаграммы громоздки и неудобны в практических расчетах, то пользуются плоскими двухкоординатными диаграммами, представляющими собой проекции полной объемной диаграммы на одну из трех плоскостей. Связь между параметрами фазового равновесного состояния системы устанавливается экспериментально для индивидуальных газов и наносится в виде пограничных кривых на диаграмму в соответствующей системе координат.

На любой диаграмме фазового состояния всегда можно выделить **рабочую точку** (в курсе физической химии ее принято называть **фигуративной** точкой), учитывающую рабочие параметры (минимум два) системы. Если в реальном процессе происходит изменение параметров, то соответственно будет перемещаться рабочая точка, при этом в системе будет совершаться определенная работа. Ход процесса изменения параметров выразится в виде линии или кривой, являющейся геометрическим местом перемещающейся рабочей точки при постепенном изменении параметров состояния системы.

Одной из часто используемых является диаграмма состояния индивидуального вещества в координатах давление – температура ($P - T$), на которой отображены условия равновесного существования фаз.

Характерной фигуративной точкой вещества на $P - T$ диаграмме равновесия является тройная точка, положение которой определяет условие одновременного существования трех фаз: газа (пара), жидкости и твердого. Для каждого индивидуального вещества положение тройной точки строго индивидуально. Из тройной точки выходят пограничные кривые, которые делят поле диаграммы на

отдельные области, определяющие условия существования отдельной фазы или совместного существования двух и даже трех фаз.

В качестве примера на рис. 1.1 представлена диаграмма состояния двуоксида углерода в координатах $P - T$ (без соблюдения масштаба).

Положение фигуративной точки В соответствует давлению $P = 5,11$ атм и температуре $216,6$ К ($-56,55^{\circ}\text{C}$) и отражает условие одновременного существования трех фаз: твердой (Т), жидкой (Ж) и газообразной (Г).

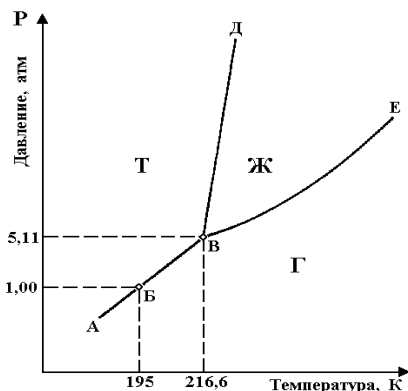


Рисунок 1.1 – Фазовая диаграмма состояния диоксида углерода в координатах $P - T$:

Фазы: Т – твердая; Ж – жидкая; Г – газообразная

Линия АВ разделяет область существования твердой и газообразной фаз и одновременно она является линией равновесия в системе между твердой и газообразной фазами. Повышение температуры при постоянном давлении вызывает переход

твердой фазы в газообразную (процесс сублимации), понижение температуры вызывает переход газообразной фазы в твердую (процесс кристаллизации), минуя жидкое состояние.

Пограничная линия ВД является равновесной линией одновременного существования твердой и жидкой фаз, при этом она разделяет области существования твердой и жидкой фаз. Любое понижение температуры (при постоянном давлении) или повышение давления смещают фазовое равновесие в сторону образования твердой фазы (кристаллизации углекислоты), повышение температуры смещает фазовое равновесие в сторону образования жидкой фазы. Пограничная линия ВЕ является равновесной для одновременного существования жидкой и газовой фаз, соответственно она разделяет области существования жидкой и газообразной фаз. Повышение температуры или понижение давления в системе для рабочей точки, располагающейся на кривой ВЕ, сместит равновесие системы в сторону образования газообразной фазы, вызывая испарение жидкости, понижение температуры и повышение давления сместят равновесие

в сторону образования жидкой фазы, способствуя конденсации газобразной фазы.

Подобного вида или несколько отличающиеся диаграммы построены для многих индивидуальных веществ и позволяют определить направление изменения параметров состояния системы для перехода вещества в желаемое агрегатное состояние или даже осуществить процессы получения аллотропных модификаций вещества (например, как теоретически установлено и экспериментально реализованы процессы получения алмаза из углерода или приобретения водородом металлических свойств при очень высоких давлениях).

1. 2 Физико-химические свойства газов и их смесей

В зависимости от происхождения различают природные и искусственно полученные газы и газовые смеси. В основу расчетов физико-химических свойств газов и газовых смесей положены индивидуальные свойства веществ, параметры состояния и газовые законы [46].

Индивидуальной характеристикой свойств газа (вещества) является его **химический состав – выраженный формулой**, в соответствии с которой при помощи специальных химических символов, утвержденных международной Ассоциацией научного образования (ASE), отражаются название и число входящих в химическую формулу атомов каждого элемента. Химическая формула позволяет определить молекулярную массу вещества, выраженную через сумму относительных (по отношению к углероду, содержащему 12 атомных единиц массы) единиц атомной массы, входящих в формулу элементов [28]. Использование структурных формул позволяет установить строение вещества в зависимости от связи атомов между собой.

Массу определенного количества вещества выражают через молярную массу и число молей соотношением

$$m = n \cdot M, \quad (1.1)$$

где m – масса вещества, кг; M – молярная (молярная) масса, кг/кмоль.

Плотностью называют массу вещества, заключенную в единице его объема и определяемую по зависимости

$$\rho = m / V. \quad (1.2)$$

Удельным объемом называют объем, занимаемый одним килограммом вещества, при этом

$$v_y = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}. \quad (1.3)$$