

## Введение

Проектирование и эксплуатация систем газоснабжения и установок для сжигания газа – очень ответственная научно-техническая задача. Решения, принимаемые проектировщиком или специалистом по эксплуатации оборудования, могут отразиться не только на здоровье, но и на жизни людей – потребителей газа, которыми все мы являемся, часто даже не отдавая себе в этом отчета.

Поэтому в обширной проблематике газоснабжения следует особо выделить этап расчета оборудования и устройств, где газ непосредственно используется, т. е. горелок, котлов, печей и т. п. Именно здесь решается вопрос об эффективности его сжигания, безопасности для человека и окружающей среды. Невозможно представить себе специалиста в области газоснабжения, который плохо ориентируется в вопросах, связанных со сжиганием газообразного топлива, не знает теоретических основ происходящих при горении процессов.

При этом нельзя не отметить, что столь важные вопросы в литературе по газоснабжению освещаются неполно. Исследования российских специалистов по процессам горения имеют большую историю и международное признание. Однако эти публикации в основном посвящены котельной технике и двигателям внутреннего сгорания. Литература же для специалистов по газоснабжению содержит ограниченные сведения по горению топлива.

В справочниках производителей газового оборудования представлены в основном задачи подбора и применения их продукции, но не содержатся теоретические основы, необходимые для подготовки инженеров газоснабжения. А ведь это один из наиболее динамично развивающихся разделов науки и техники в общегражданском и промышленном строительстве. Авторы надеются, что этот пробел хотя бы частично восполнит пособие, которое уважаемый читатель держит перед собой.

Книга предназначена в первую очередь для студентов специальности «Теплогазоснабжение и вентиляция» в качестве учебного пособия по программам подготовки бакалавров и магистров при изучении профилирующего предмета «Газоснабжение», а также целого ряда предметов по выбору студента, таких, например, как «Газооборудование промышленных предприятий», «Анализ эффективности энергосбережения в котельных и ТЭЦ», «Охрана воздушного бассейна», «Оптимизация природоохранных мероприятий» и других. Издание предназначено также для широкого круга специалистов, занимающихся проектированием, строительством и эксплуатацией систем газораспределения, газоиспользующего оборудования источников теплоты и промышленных предприятий, т. е. систем газоснабжения в самом широком понимании этого термина. Книга может быть использована учащимися средних профессиональных учебных заведений при изучении предметов, связанных с газоснабжением, а также слушателями факультетов повышения квалификации инженерно-технических работников. Пособие также может быть полезно для аспирантов и научных работников, занимающихся проблематикой сжигания топлива.

С учетом рассматриваемых в пособии вопросов и задач ее содержание можно условно поделить на три части:

1) в главах 1–5 подробно рассмотрены свойства горючих газов, физико-химические основы реакций горения, их тепловой эффект и материальный баланс, а также приведены необходимые сведения из области теории горения и взрыва;

2) в главах 6 и 7 рассмотрены практические вопросы эффективного и безопасного сжигания газового топлива в бытовых и промышленных газоиспользующих устройствах. Представлены методы обеспечения стабильности горения, основополагающие сведения по конструкции и принципам действия газовых горелок для бытового, коммунального, промышленного и энергетического оборудования газовой техники;

3) в главах 8 и 9 представлены вопросы, которые особенно важны в эксплуатации систем газоснабжения и газового оборудования, т. е. задачи снижения образования и выбросов в атмосферу вредных компонентов продуктов сгорания, а также расчетов по эффективности использования топлива.

При работе над монографией авторы старались сохранить сбалансированное представление теоретических основ и информации по их практическому применению для расчетов и проектирования. Поэтому в пособии содержатся примеры расчетов, связанных с рассматриваемыми задачами, а также многочисленные таблицы, необходимые для расчетов.

Слова глубокой признательности и уважения авторы высказывают профессору Николаю Лукичу Стаскевичу, чей многолетний практический, научный и педагогический опыт был использован в настоящей книге. Себя авторы по-прежнему считают только его прилежными и преданными учениками.

Сердечно благодарим Елену Владимировну Баженову – заведующую редакцией инженерно-технической литературы издательства за предложение публикации книги и ценную помощь во время сложного издательского процесса.

# Глава 1

## Свойства газового топлива

### 1.1. Основные понятия и используемые величины

**Газовым топливом** называются смеси газов (горючих и негорючих), которые в результате своего химического состава и сродства к кислороду подвергаются быстрому окислению в виде реакции горения с выделением большого количества энергии и резким ростом температуры [30]. Нередко в качестве синонимов используются определения «газообразное топливо» и «горючий газ». Горючие газы могут использоваться не только как топливо, но также в различных отраслях промышленности как ценное химическое сырье.

**Состав газообразного топлива** в большинстве случаев представляется в объемных процентах (% об.) или в объемных (мольных) долях (безразмерная величина, которая в сто раз меньше по сравнению с объемными процентами). Суммарный состав топлива, выраженный в % об., равен 100%, тогда как сумма объемных долей всех компонентов равна 1,0. Реже используется массовый состав, главным образом для представления содержания вредных веществ, например, в  $\text{мг/м}^3$ ,  $\text{г/м}^3$ . Содержание каждого компонента в газовом топливе обозначается символом  $C_i$  (с соответствующим нижним индексом), например:

$$C_{\text{CH}_4} = 94,5\% \text{ об. или } C_{\text{CH}_4} = 0,945.$$

В технических текстах допустим также упрощенный способ записи:

$$\text{CH}_4 = 94,5\% \text{ об. или } \text{CH}_4 = 0,945.$$

Единицей **количества** газообразного топлива в большинстве технических расчетов является  $1 \text{ м}^3$  при **нормальных физических условиях**, т. е. при абсолютном давлении 101 325 Па и температуре  $0^\circ\text{C}$  (273,15 К) [20]. В коммерческих расчетах могут применяться другие условия – технические, которые оговариваются в характеристиках приборов для измерения количества газового топлива. Кроме того, чтобы избежать привязки к конкретному виду топлива, во многих расчетах экономического характера и прогнозах газопотребления используются энергетические единицы, например МДж.

**Абсолютное давление  $p$** , Па (кПа, МПа) (англ. *absolute pressure, zero-referenced pressure*) – это давление, отсчитываемое от абсолютного вакуума, которому приписана величина давления, равная нулю [30]. С физической точки зрения это полное давление, вызванное беспорядочным движением молекул газа (так называемым броуновским движением). Единичные импульсы, передаваемые стенке сосуда при каждом ударе молекулы, суммируются по площади и во времени, образуя непрерывную силу давления.

На практике абсолютное давление понимается как алгебраическая сумма барометрического давления  $p_b$  и избыточного давления  $p_n$ :

$$p = p_b + p_n. \quad (1.1)$$

**Барометрическим (атмосферным) давлением** (англ. *atmospheric pressure, ambient pressure*) называется абсолютное давление той среды, в которой находится газопровод, арматура, устройство для сжигания газа и т. п. В технике газоснабжения такой средой чаще всего является атмосфера, однако, распространенный термин «атмосферное давление» в научной терминологии менее желателен [30].

**Избыточное давление** (англ. *gauge pressure, manometric pressure*) представляет собой разность между абсолютным и барометрическим давлением. Именно эту величину показывает любой манометр, независимо от принципа его действия:

$$p_{\text{и}} = p - p_{\text{б}}. \quad (1.1^*)$$

В случае, когда абсолютное давление меньше барометрического, используется понятие **разрежения (вакуума)**, англ. *underpressure, vacuum*). Встречаемое в литературе определение «вакуумметрическое давление» следует признать крайне неудачным смешением понятий. Разрежение  $h$  равно разности барометрического и абсолютного давлений:

$$h = p_{\text{б}} - p. \quad (1.2)$$

**Теплотой сгорания (калорийностью)** топлива (англ. *heating value, calorific value*) называется количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании 1 м<sup>3</sup> горючего газа (до конечных продуктов окисления) [23]. В газоснабжении различают высшую и низшую теплоту сгорания.

**Высшая теплота сгорания** (англ. *superior calorific value, SCV*),  $Q_{\text{в}}$ , МДж/м<sup>3</sup>, соответствует условиям, когда вода, **являющаяся продуктом реакций горения** и находящаяся в газообразном состоянии, полностью конденсируется [23]. Нетрудно сделать вывод, что продукты сгорания должны быть для этого охлаждены до температуры газа и воздуха, поступающих на горение [30]. Тогда образовавшаяся при горении вода сконденсируется, а водяной пар, содержащийся в газе и воздухе, останется в газообразном состоянии. Однако это чисто лабораторный подход, поскольку в технике газ и воздух перед горением могут иметь различную температуру. Поэтому определяющим является термодинамическое требование полной конденсации образовавшейся при горении воды.

**Низшая теплота сгорания** (англ. *interior calorific value, ICV*),  $Q_{\text{н}}$ , МДж/м<sup>3</sup>, соответствует условиям, при которых вода, **являющаяся продуктом реакций горения**, остается в газообразном состоянии (в виде водяного пара) [23]. Следовательно, низшая теплота сгорания всегда меньше высшей на величину скрытой теплоты парообразования (конденсации) всей образовавшейся при горении воды (что составляет примерно 2,5 МДж на каждый килограмм H<sub>2</sub>O).

Из этого следует, что низшая теплота сгорания является максимальным количеством энергии, которым можно располагать, сжигая газ в устройствах, основанных на традиционных принципах. Исключение составляют так наз. конденсационные котлы и другие теплотехнические устройства, в которых происходит охлаждение продуктов сгорания ниже температуры точки росы, что

приводит к конденсации водяных паров [30]. В этом случае мы располагаем высшей теплотой сгорания топлива.

**Плотность** газа (англ. *density*),  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup> – это масса 1 м<sup>3</sup> газа в нормальных или действительных условиях, что обязательно должно оговариваться. Характерной особенностью газоснабжения является использование понятия **относительной плотности** (англ. *relative density*) газа  $\bar{\rho}$ , которая представляет собой отношение абсолютной плотности газа и воздуха в одинаковых условиях [23]. Учитывая, что плотность сухого воздуха в нормальных физических условиях составляет 1,293 кг/м<sup>3</sup>, можно получить

$$\bar{\rho} = \frac{\rho}{1,293}. \quad (1.3)$$

**Число Воббе** (в зарубежной литературе – *Wobbe index*)  $Wo$  (в заграничной литературе встречаются обозначения  $W$  и  $I_w$ ), МДж/м<sup>3</sup>, – это характеристика газового топлива, связанная с высшей или низшей теплотой сгорания газа  $Q_{в(н)}$  и его относительной плотностью  $\bar{\rho}$  следующим соотношением [22]:

$$Wo_{в(н)} = \frac{Q_{в(н)}}{\sqrt{\bar{\rho}}}. \quad (1.4)$$

Этот важнейший для газоснабжения показатель характеризует взаимозаменяемость газообразных топлив без необходимости изменять конструкцию горелок. Газы с близким значением числа *Воббе* и близкой скоростью горения можно эффективно и безопасно сжигать при помощи тех же горелок, с тем же диаметром газового сопла. При этом сохраняется тепловая мощность горелки.

Физический смысл выражения (1.4) связан с процессами истечения газов. Скорость истечения обратно пропорциональна плотности газа [2]. Таким образом, расход газа с большей плотностью через сопло оказывается меньшим. Но, если теплота сгорания газа будет пропорционально выше, то расход воздуха на горение и количество выделяющейся теплоты остаются примерно такими же.

## 1.2. Состав газового топлива

### 1.2.1. Характеристики состава газового топлива

В первую очередь рассматривается так называемый **сухой состав** газа как не зависящий от условий транспортировки и хранения топлива [23]. Характеристики газа, соответствующие его сухому составу, обозначаются верхним индексом «с», например:  $C_i^c$ ,  $Q_n^c$ ,  $\rho^c$ ,  $\bar{\rho}^c$  и т. д.

Но в действительности газ никогда не бывает абсолютно сухим. Поэтому на практике часто требуется пересчитать характеристики газа на его **рабочий состав** (с учетом содержания влаги), что обозначается верхним индексом «р», т. е.:  $C_i^p$ ,  $Q_n^p$ ,  $\rho^p$ ,  $\bar{\rho}^p$  и т. д. Для этого сначала, в зависимости от влажности газа

$d_r$ , кгН<sub>2</sub>О/м<sup>3</sup>, рассчитывается вспомогательный коэффициент [22], оказывающий понижающее действие на все характеристики, относимые к объему:

$$k = \frac{0,804}{0,804 + d_r}. \quad (1.5)$$

После этого почти все характеристики сухого состава газа можно пересчитать на его рабочий (влажный) состав, используя закон *Авогадро*, по выражениям следующего вида:

$$C_i^p = C_i^c k; \quad (1.6)$$

$$Q_H^p = Q_H^c k. \quad (1.7)$$

Для плотности газа в рабочем составе справедливо выражение

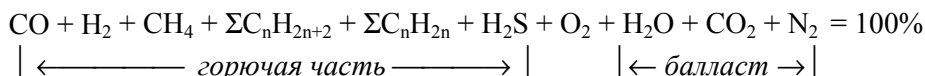
$$\rho^p = (\rho^c + d) k. \quad (1.8)$$

Исключение составляет объемное содержание воды, поскольку в сухом составе этот показатель отсутствует. Поэтому используется выражение

$$C_{H_2O}^p = \frac{d_r}{0,804} k = \frac{d_r}{0,804 + d_r}. \quad (1.9)$$

### 1.2.2. Компоненты газообразного топлива

Физико-химические и теплотехнические характеристики газообразного топлива обусловлены наличием в его составе различных компонентов. Действительный (влажный) состав газового топлива можно схематически описать формулой, представленной на рисунке 1.1.



**Рис. 1.1.** Условный состав газового топлива

В сухом составе того же газа отсутствует водяной пар. Горючие компоненты представляют собой полезную основу любого топлива. Негорючие газы и примеси, в том числе и горючие, являются балластом газового топлива, ухудшающим его теплотехнические, эксплуатационные и экологические качества. К примесям относят сероводород, аммиак, цианистые соединения, водяные пары, нафталин, смолы, пыль и др.

Кислород в составе топлива, формально являющийся негорючим веществом, следует отнести к полезным компонентам, поскольку он принимает участие в реакциях горения [30]. Причем, будучи хорошо перемешанным с горючими компонентами, он ускоряет процессы горения и уменьшает необходимость подвода окислителя извне.

#### Горючие компоненты.

**Насыщенные углеводороды** (углеводороды так называемого **предельного** или **парафинового** ряда) составляют основную горючую часть углеводородных горючих газов и описываются общей химической формулой  $\text{C}_n \text{H}_{2n+2}$ .

Первым в этом ряду следует метан ( $\text{CH}_4$ ), затем – этан ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), пропан ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), бутан ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ), пентан ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ) и т. д. Метан является главным горючим компонентом всех природных газов. С ростом молекулярной массы углеводородов увеличивается их теплота сгорания, плотность и склонность к конденсации при понижении эксплуатационной температуры [15].

Насыщенные углеводороды характеризуются высокой теплотой сгорания, не имеют цвета и запаха и не токсичны. В высоких концентрациях проявляют, однако, слабое наркотическое действие (особенно высокомолекулярные углеводороды). При скоплениях в помещении в концентрациях, превышающих 10% об., они способны вызывать удушье из-за недостатка кислорода воздуха.

**Непредельные (ненасыщенные) углеводороды** (общая формула  $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ ) входят в значительных количествах в состав сжиженных углеводородных и некоторых искусственных газов. Углеводороды этого ряда: этилен ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ), пропилен ( $\text{C}_3\text{H}_6$ ), бутилен ( $\text{C}_4\text{H}_8$ ) и последующие, по своим свойствам сходны с предельными углеводородами.

**Водород** ( $\text{H}_2$ ) присутствует почти во всех искусственных газах. Это горючий газ без цвета, запаха и вкуса, не токсичен. В реакциях горения водород весьма активен в широких концентрационных пределах.

**Оксид углерода** ( $\text{CO}$ ) – горючий газ без цвета, запаха и вкуса, очень токсичен. Содержится в больших количествах в искусственных газах, а также образуется при неполном сгорании топлива.

#### **Негорючие компоненты.**

**Диоксид углерода** ( $\text{CO}_2$ ) не имеет цвета и запаха, со слабым кисловатым вкусом. Токсические свойства газ проявляет только при большом содержании (более 3÷5% об.) [30]. При скоплении в помещении он способен вызвать также удушье из-за недостатка кислорода воздуха. Сам химически инертен, но в присутствии влаги образует угольную кислоту и содействует коррозии. Входит в группу так называемых парниковых газов.

**Азот** ( $\text{N}_2$ ) – газ без цвета, запаха и вкуса, не горит и не поддерживает горение, не токсичен, является основным компонентом атмосферного воздуха. При высоких температурах, в том числе при горении, происходит образование оксидов азота, являющихся высокотоксичными компонентами продуктов сгорания.

**Кислород** ( $\text{O}_2$ ) – газ без цвета, запаха и вкуса, не горит, но участвует в горении как основной окислитель. Поэтому его присутствие в газе уменьшает потребность в доставке окислителя в зону горения извне. Содержится в небольших количествах в некоторых искусственных газах. В присутствии влаги активно способствует коррозии металла газопроводов и арматуры.

#### **Примеси.**

**Сероводород** ( $\text{H}_2\text{S}$ ) – бесцветный горючий газ с характерным запахом тухлых яиц. Может содержаться в искусственных и некоторых, плохо очищенных природных газах. Как сам сероводород, так и продукты его сгорания (оксиды серы  $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$ ), весьма токсичны и агрессивны. Кроме того, они образуют с железом пиррофорные соединения, способные самовоспламеняться в воздухе [23].

**Аммиак** ( $\text{NH}_3$ ) – бесцветный газ с острым запахом нашатырного спирта, вредная токсичная примесь некоторых искусственных газов.

**Цианистые соединения**, прежде всего **синильная кислота** ( $\text{HCN}$ ), могут образоваться в коксовых газах в результате взаимодействия углерода топлива с аммиаком. При нормальных условиях  $\text{HCN}$  – бесцветная легкая жидкость с высокими токсичными и коррозионными свойствами.

**Водяной пар** всегда содержится даже в осушенных газах. Способствует коррозии. При высоких давлениях образует с углеводородами кристаллогидратные соединения, внешне напоминающие частички снега или льда, которые могут нарушать работу устройств регулирования и безопасности. Тем же опасны обычные лед и иней, образующиеся в результате конденсации водяного пара и последующего замерзания. Этот происходит при резком уменьшении температуры в результате снижении давления газа на газорегуляторных станциях (эффект *Джоуля – Томсона*). Именно поэтому газ предварительно подогревается.

**Нафталин, смолы и твердые частицы** (пыль) присутствуют в газе только при его плохой очистке и, откладываясь на внутренних стенках газопроводов, уменьшают их проходное сечение, преждевременно засоряют фильтры, арматуру и другие устройства [30].

### 1.2.3. Вредные свойства горючих газов

Горючие газы могут иметь опасные для человека и окружающей среды свойства, зависящие от содержания в них токсичных компонентов, к которым относятся  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2\text{S}$  [15].

**Диоксид углерода**  $\text{CO}_2$  является вредным для организма человека, если его содержание во вдыхаемом воздухе составляет более 3÷5% об. [30].

**Оксид углерода**  $\text{CO}$  (угарный газ) является очень опасным для человека химическим соединением при содержании в воздухе от 0,2 г/м<sup>3</sup> (0,016% об.). При концентрации 0,5 г/м<sup>3</sup> (0,04% об.) смерть наступает через несколько часов, а при более высоком содержании – почти мгновенно. Соединяясь с гемоглобином крови,  $\text{CO}$  образует карбоксигемоглобин – гораздо более стойкое соединение по сравнению с оксигемоглобином (соединением гемоглобина с кислородом). Таким образом, оксид углерода лишает кровь способности переносить к тканям организма кислород, и смерть наступает в результате нарушения функций дыхания и кровообращения [3]. Близок по плотности к воздуху и легко с ним смешивается, поэтому датчики  $\text{CO}$  устанавливаются на высоте 1,6 м.

**Сероводород**  $\text{H}_2\text{S}$  является еще более опасным веществом, чем  $\text{CO}$ : при содержании в воздухе более 0,1 г/м<sup>3</sup> (0,0066% об.) сероводород вызывает отравление, концентрация 0,2 г/м<sup>3</sup> (0,013% об.) грозит смертью через несколько часов, а 0,5 г/м<sup>3</sup> – через 30 мин [3].

Как уже выше отмечено, пропан, бутан и большинство высших углеводородов обладают наркотическими свойствами. Их действие ослаблено малой растворимостью в крови, но при концентрации этих компонентов в воздухе более 10% об. они могут вызывать отравление, которое проявляется головной болью, рвотой и общим ослаблением организма [30].



Остальные компоненты газового топлива, даже не будучи токсичными, при значительном содержании их в воздухе (более 10% об.) могут привести к тому, что организм человека не будет получать необходимого количества кислорода, что косвенно может стать причиной его удушья.

В таблице 1.1 приведены некоторые физические характеристики главных компонентов газового топлива, необходимые для рассматриваемых в книге вопросов. Однако чаще всего газовое топливо представляет собой смесь этих компонентов. Зная компонентный состав газа, его параметры можно рассчитать на основании соответствующих характеристик отдельных компонентов, используя правило аддитивности (следствие закона *Авогадро*), по выражению

$$F = C_1 F_1 + C_2 F_2 + \dots C_i F_i + \dots C_n F_n, \quad (1.10)$$

где  $F$  – рассчитываемая физическая характеристика смеси газов;  $C_i$  – объемная (мольная) доля компонента в смеси;  $F_i$  – величина соответствующей характеристики отдельных компонентов.

**Таблица 1.1.** Физические характеристики основных компонентов газового топлива (при температуре 0°C и давлении 101 325 Па) [22]

Наименование газа	Химическая формула	Молекулярная масса	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Относительная плотность	Кэфф. динам. вязкости, Па·с×10 <sup>6</sup>	Высшая теплота сгорания, МДж/м <sup>3</sup>	Низшая теплота сгорания, МДж/м <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
Метан	CH <sub>4</sub>	16,043	0,7175	0,5549	10,22	39,831	35,894
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30,070	1,3551	1,0481	8,51	70,330	64,38
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,097	2,0098	1,5545	7,46	101,15	93,11
<i>n</i> -бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58,123	2,7091	2,0953	6,86	134,11	123,86
<i>izo</i> -бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58,123	2,7068	2,0953	6,92	133,57	123,33
Пропен	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42,081	1,9138	1,4802	7,75	93,60	87,59
Водород	H <sub>2</sub>	2,0159	0,0899	0,0696	8,35	12,752	10,782
Оксид углерода	CO	28,010	1,2505	0,9672	16,59	12,64	12,64
Азот	N <sub>2</sub>	28,0135	1,2504	0,9671	16,52	–	–
Кислород	O <sub>2</sub>	31,9988	1,4290	1,1053	19,11	–	–
Диоксид углерода	CO <sub>2</sub>	44,010	1,9768	1,5289	13,75	–	–
Воздух (сухой)	–	28,9626	1,292923	1,0000	17,08	–	–

### 1.3. Виды газового топлива

#### 1.3.1. Классификация горючих газов

В практике газоснабжения применяются различные газы, отличающиеся по происхождению, химическому составу и физическим свойствам. Основной характеристикой горючего газа, как и любого другого топлива, является его теплота сгорания [23]. С этой точки зрения газообразные топлива условно подразделяются на:

- низкокалорийные – с низшей теплотой сгорания до  $6,7 \text{ МДж/м}^3$  ( $1600 \text{ ккал/м}^3$ );
- средней калорийности –  $6,7 \div 10,5 \text{ МДж/м}^3$  ( $1600 \div 2500 \text{ ккал/м}^3$ );
- высококалорийные – более  $10,5 \text{ МДж/м}^3$  ( $2500 \text{ ккал/м}^3$ ).

Кроме приведенной выше классификации, газовое топливо подразделяется в зависимости от способа его получения на:

- газы естественного происхождения (природные газы);
- искусственные газы (производимые промышленными методами из других видов топлива или иного сырья);
- сжиженные углеводородные газы;
- биогаз;
- другие виды газового топлива.

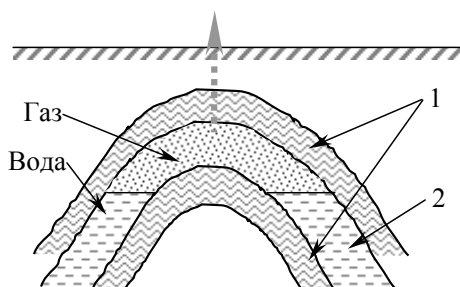
#### 1.3.2. Природный газ

**Природным газом** называются смеси газов и паров, добываемые из земных недр и отличающиеся главным образом большим содержанием метана. Кроме термина «природный газ» (например, англ. *natural gas*), в зарубежной литературе используется также название «земной газ» (например, нем. *Erdgas*, пол. *gaz ziemny*) [30].

Природный газ может встречаться в чисто газовых месторождениях, в нефтегазовых и газоконденсатных. В двух первых случаях под землей существует естественная **антиклинальная** структура, такая же, какие используются для подземных газовых хранилищ (рис. 1.2). В этом природном коллекторе между двумя газонепроницаемыми пластами (сланцевые глины, плотные известняки, мергели, солевые породы) находится газоносный (продуктивный) пористый слой (пески, песчаники, пористые известняки, доломит и т. п.) [13].

Пластовая (подошвенная) вода, заполняющая нижнюю часть пористой структуры, изолирует газовую часть и во многих случаях создает избыточное давление, упрощающее добычу газа. Иногда это давление даже настолько высоко, что приходится его снижать.

Газ, добываемый из **газовых месторождений** (так называемый **сухой** природный газ), характеризуется самым большим содержанием метана. Российские месторождения на полуострове Ямал, являющиеся основным источником газоснабжения страны и Западной Европы, дают газ с содержанием метана  $86 \div 98,5\%$ . Низшая теплота сгорания таких газов составляет  $33,4 \div 35,1 \text{ МДж/м}^3$ , а средняя плотность –  $0,72 \div 0,73 \text{ кг/м}^3$ .



**Рис. 1.2.** Принципиальная схема газового месторождения:  
1 – газонепроницаемые породы; 2 – газоносный пористый слой.

Общие требования к природным газам определяет ГОСТ 5542-2014 [6], в соответствии с которым их состав не нормируется, но обязательно определяется. Теплота сгорания газа должна составлять не менее  $31,6 \text{ МДж/м}^3$ , а число *Воббе* может колебаться в пределах  $41,2 \div 51,4 \text{ МДж/м}^3$ . Отклонение числа *Воббе* от номинального значения не должно превышать  $\pm 5\%$ .

Следует подчеркнуть, что в соответствии с ГОСТ 31369-2008 [7] стандартными условиями для этих показателей являются давление  $101\,325 \text{ Па}$  и температура  $25^\circ\text{C}$ . Это весьма существенно, поскольку объем газа при такой температуре почти на 10% больше, чем при нормальных физических условиях, что следует из закона Бойля – Мариотта:  $298/273 = 1,0916$ . Это пропорционально снижает значение всех показателей, относящихся к единице объема.

В нефтегазовом месторождении слои в пористом пласте расположены в соответствии с плотностью вещества. Выше всего находится газ, затем нефть, а ниже всего – вода, заполняющая остаток миграционной полости. Из таких залежей добывается так называемый «попутный» (нефтяной, газолиновый) газ, характеризующийся повышенным содержанием высших углеводородов. Попутный газ может содержать менее 40% метана, зато суммарная концентрация компонентов от этана до пентана может составлять более 50% (причем самого пентана – до 5%) [13, 23, 30].

Такой газ нельзя транспортировать, поскольку тяжелые фракции углеводородов легко конденсируются. Традиционным методом обработки попутного газа является его дегазолинизация, т. е. разделение на сухой газ и сырой газолин (газовый бензин). Из сырого (нестабильного) газолина производится стабильный газолин (т. е. обычный бензин) и пропано-бутановая фракция. Сложной проблемой является то, что описанная кратко переработка попутного газа должна производиться непосредственно на промысле, что влечет за собой строительство целого промышленного комплекса и соответственно значительные инвестиции. Из-за сложности и дороговизны технологии обработки попутного газа он ранее просто сжигался на месторождениях. В настоящее время это считается недопустимым, и государство экономически стимулирует глубокую переработку или использование этого вида топлива как химического сырья [30].

Разновидностью природного газа является **забалластированный газ**. Он может содержать значительное количество азота ( $30\div 40\%$ ), иногда даже до  $60\%$ . Такой газ стараются использовать страны, не имеющие залежей природного газа с высоким содержанием метана. Например, польское месторождение в окрестностях г. Остров Велькопольски дает газ с содержанием азота  $42\%$  и метана –  $55\%$ . Он отличается по характеристикам от типичных природных и сжиженных углеводородных газов и по величине числа *Воббе* близок к искусственным газам, получаемым методом сухой дистилляции каменного угля [30].

Устройства для сжигания забалластированного газа должны иметь соответствующим образом приспособленную конструкцию горелок, чтобы их тепловая мощность существенно не отличалась от устройств, работающих на газе с высоким содержанием метана.

Предполагаемое истощение запасов природного газа привело к повышенному интересу, проявляемому к так называемому **газоконденсатным месторождениям**. Газовые конденсаты – это жидкие смеси углеводородов различного строения, которые обычно залегают очень глубоко, нередко под дном океана. Это приводит к тому, что в пластовых условиях они находятся при высоком давлении (от  $10$  до  $60$  МПа) и температуре. При разработке месторождений давление падает в несколько раз – до  $4\div 8$  МПа, и начинаются сложные термодинамические процессы с изменением фазового состояния вещества и выделением более легких компонентов, растворенных в высокомолекулярных [30].

Переработка газового конденсата так же сложна, как и попутного нефтяного газа, и должна производиться непосредственно на месторождениях. Необходимо разделить нестабильный конденсат на стабильный (бензино-керосиновую фракцию, т. е. углеводороды от  $C_5$  и выше) и растворенные в нестабильном конденсате газы метано-бутановых фракций. При этом применяются дорогостоящие аппаратура и трубопроводы из-за высокого давления, необходимого для вытеснения газа и транспортировки. Однако в перспективе разработка газоконденсатных месторождений может стать надежным источником природного газа.

Еще более новым и не менее перспективным видом природных газов является **метан угольных пластов**. Только в ноябре 2011 г. этот вид газового топлива был признан самостоятельным полезным ископаемым и внесен в «Общероссийский классификатор полезных ископаемых и подземных вод». Прогнозные ресурсы метана в основных, наиболее газоносных угольных бассейнах России (Тунгусском, Ленском и Кузнецком) оцениваются в  $83,7$  трлн  $m^3$ , что соответствует примерно трети прогнозных ресурсов природного газа страны [24].

Однако широкое использование «угольного» метана требует решения целого ряда технических и организационных проблем. «Шахтный» метод является неотъемлемой частью технологии подземной добычи угля и тесно связан с процессом дегазации шахт для предотвращения взрывов. Проблемой этого метода является малая концентрация метана, из-за чего до  $2$  млрд  $m^3$  газа ежегодно теряется.

«Скважинный» метод не связан с зоной горных работ и заключается в бурении специальных скважин для добычи пластового метана. Газпром уже приступил к реализации первого такого проекта. Две газопоршневые электростанции, работающие на метане угольных пластов, введены в эксплуатацию на Талдинском месторождении в Кузбассе.

### **Обработка природного газа**

Для добычи газа в местах газовых и нефтегазовых месторождений бурятся эксплуатационные скважины. Непосредственно на месте получения газа он подвергается предварительной обработке, которая состоит из осушки, очистки, удаления вредных примесей [13, 23].

Одним из наиболее вредных свойств добываемого газа является его влажность, вызывающая существенные эксплуатационные проблемы во время транспортировки. При определенных сочетаниях давления и температуры влага может конденсироваться, создавая водяные пробки и кристаллогидраты, в присутствии сероводорода и кислорода интенсифицировать процессы коррозии труб и арматуры, а при низких температурах замерзать на элементах регулирующих устройств, нарушая их работу. Чтобы предотвратить эти явления, газ осушается так, чтобы температура его точки росы по влаге была на  $5\div 7^\circ\text{C}$  ниже минимальной рабочей температуры газа во время его транспортировки.

Перед транспортировкой из газа удаляется сероводород и диоксид углерода. В соответствии с [6] содержание  $\text{H}_2\text{S}$  в горючих газах, используемых для газификации населенных мест, не должно превышать 2 г на  $100\text{ м}^3$ , а концентрация  $\text{CO}_2$  – 2,5% об.

Большинство компонентов газового топлива не имеет заметного собственного запаха. Исключением является  $\text{H}_2\text{S}$ , который имеет очень неприятный запах, но встречается крайне редко. С целью легкого обнаружения присутствия газа в воздухе производится его одоризация путем добавления веществ с острым, выразительным запахом. В настоящее время это выполняется на главных газораспределительных станциях (ГРС) в точках приема газа из магистральных газопроводов.

Чаще для этого используются химические соединения из группы меркаптанов (тиоалкаголей), содержащие SH-группу. В нашей стране для одоризации используется преимущественно этилмеркаптан (этантиол)  $\text{C}_2\text{H}_5\text{SH}$ . Это жидкость с плотностью  $0,83\text{ кг/м}^3$ , легко испаряющаяся и горючая. Нижний предел воспламеняемости паров составляет 2,8% об., а верхний – 18,2% об. Уникальные свойства этого соединения приводят к тому, что человек ощущает его присутствие в воздухе уже при концентрации 1 часть на 500 млн [13].

Поскольку сам природный газ практически безвреден для человека, за необходимую границу его органолептического обнаружения принято содержание, которое в несколько раз ниже нижнего предела взрываемости (см. главу 4).

На практике это означает добавку всего 16 г одоранта на  $1000\text{ м}^3$  газа (т. е. примерно на 750 кг). Такая доза является безопасной с точки зрения загрязнения окружающей среды соединениями серы. В большинстве европейских стран

для одоризации широко используется другой одорант этого же ряда – тетрагидротиофен  $C_4H_8S$ .

### 1.3.3. Сжиженные углеводородные газы

**Сжиженные углеводородные газы** (СУГ, пропан-бутан, иногда просто пропан) относятся к группе углеводородных топлив, которые при нормальных физических условиях находятся в газообразном состоянии, а под давлением, не превышающим 2,5 МПа (25 бар), и при комнатной температуре переходят в жидкое состояние [21].

Даже для этана критическая температура [2] составляет  $+32,3^{\circ}C$  (для пропана –  $95,7^{\circ}C$ ; для *n*-бутана –  $152,8^{\circ}C$ ). Такие характеристики топлива позволяют безопасно транспортировать и хранить его в замкнутых сосудах под небольшим давлением, а использовать после регазификации в газообразной фазе.

В российской и зарубежной технической литературе для определения этого вида топлива используются термины «жидкий», «сжиженный», «сконденсированный» (англ. *Liquefied petroleum gas, LPG*). Эти термины, однако, не означают, что СУГ используются в жидком виде в горелочных устройствах, а только указывают на техническую несложность изменения его фазового состояния на жидкое. Таким образом, речь идет о **газовом топливе**, имеющем техническое название «**сжиженный газ**». Только транспорт и хранение этого вида топлива производятся в жидком состоянии, а перед подачей в газораспределительную систему и использованием обязательно производится регазификация.

Этот вид газообразного топлива имеет широкое применение для газоснабжения коммунально-бытовых и промышленных потребителей, расположенных вне зоны охвата сети газоснабжения природного газа. Весьма популярным является использование этого вида топлива для автомобильных двигателей. При незначительном снижении мощности двигателя это позволяет существенно снизить эксплуатационные затраты автомобиля и уменьшить выбросы продуктов неполного сгорания в атмосферу.

Сжиженный газ представляет собой преимущественно смесь пропана и бутана с незначительным количеством других углеводородов. Некоторые физико-химические характеристики этих углеводородов приведены в таблице 1.2, а термодинамические характеристики основных компонентов сжиженного газа – в таблице 1.3.

Сжиженный газ производится в процессе дегазолинизации природного газа, получаемого из нефтегазовых месторождений (см. п. 1.3.2), путем переработки нефти методами гидролиза и синтеза, и формально может быть причислен к группе искусственных газов, однако выделен в отдельный вид газового топлива [21, 30].

В соответствии с ГОСТ 52087-2003 [8] сжиженный газ делится на пропан технический (ПТ, содержащий не менее 75% пропана и пропена), пропан-бутан технический (ПБТ, с содержанием не более 60% бутанов и бутенов), бутан технический (БТ, содержащий не менее 60% бутанов и бутенов), а также автомобильные марки – пропан (ПА) и пропан-бутан (ПБА).

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)