

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
**«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

# **Основы ресурсо-энергосберегающих технологий углеводородного сырья**

**Конспект лекций**

**Часть 1**

Издательство  
Томского политехнического университета  
Томск 2011

УДК 681.783.2 (076.5)  
Ш16

**Антропова Н.А.**

A16 Основы ресурсо-энергосберегающих технологий углеводородного сырья:  
конспект лекций / Н.А. Антропова. – Томск: Изд-во Национального  
исследовательского Томского политехнического университета, 2011. – 139 с.

## Оглавление

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ЛЕКЦИЯ 1. Состояние топливно-энергетического комплекса в России и мире .....        | 5  |
| 1.1. Глобальные проблемы, стоящие перед человечеством в третьем тысячелетии .....   | 5  |
| 1.2. Структура мирового производства энергоресурсов.....                            | 8  |
| 1.3. Тенденции развития мировой энергетики.....                                     | 13 |
| 1.4. Топливо-энергетический комплекс РФ .....                                       | 20 |
| 1.5. Энергосбережение – комплексная развивающаяся научно-техническая проблема ..... | 21 |
| 1.6. Аспекты низкой энергетической эффективности .....                              | 23 |
| 1.7. Получение тепла и электроэнергии на теплоэлектростанции .....                  | 27 |
| ЛЕКЦИЯ 2. Состояние топливно-энергетического комплекса в России и мире .....        | 28 |
| 2.1. Нормативно-правовая база энерго- и ресурсосбережения .....                     | 28 |
| 2.2. Новая техническая политика в области энергетики.....                           | 31 |
| 2.3. Энергетические обследования предприятий .....                                  | 32 |
| 2.4. Энергетический баланс и потенциал энергосбережения.....                        | 36 |
| 2.5. Энергетический паспорт предприятия .....                                       | 69 |
| 2.6. Энергоаудит .....                                                              | 70 |
| 2.7. Международное сотрудничество в области энергосбережения .....                  | 71 |
| ЛЕКЦИЯ 3. Основные понятия и законы энергосбережения .....                          | 73 |
| 3.1. Введение .....                                                                 | 73 |
| 3.2. Виды топливно-энергетических ресурсов .....                                    | 73 |
| 3.3. Технологические характеристики топлива .....                                   | 75 |
| 3.3.1. Теплотворная способность топлива (теплота сгорания) $Q$ .....                | 75 |
| 3.3.2. Жаропроизводительность топлива (максимальная температура, $t_{max}$ ) .....  | 78 |
| 3.3.3. Стехиометрический коэффициент .....                                          | 80 |
| 3.4. Термодинамические расчеты в энергосбережении .....                             | 81 |
| 3.4.1. Законы Г.И. Гесса .....                                                      | 81 |
| 3.4.2. Зависимость теплоты реакции от температуры.....                              | 82 |
| 3.4.3. Теплоемкость вещества .....                                                  | 82 |
| ЛЕКЦИЯ 4. Сжигание горючих газов в кислороде.....                                   | 84 |
| 4.1. Водород .....                                                                  | 84 |
| 4.1.1. Высшая и низшая теплота сгорания топлива .....                               | 84 |
| 4.1.2. Жаропроизводительность .....                                                 | 86 |
| 4.2. Оксид углерода .....                                                           | 87 |
| 4.3. Метан .....                                                                    | 89 |
| ЛЕКЦИЯ 5. Сжигание горючего в воздухе.....                                          | 92 |
| 5.1. Водород .....                                                                  | 92 |
| 5.2. Метан .....                                                                    | 93 |
| 5.3. Теплота сгорания жидких углеводородов.....                                     | 94 |
| 5.4. Формула Д.И. Менделеева для вычисления теплоты сгорания топлива .....          | 95 |

|                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ЛЕКЦИЯ 6. Энергетический и тепловой балансы .....                                         | 98  |
| 6.1. Закон А. Эйнштейна.....                                                              | 98  |
| 6.2. Уравнение теплового баланса в общем виде .....                                       | 99  |
| 6.3. Диаграммы энергетического и материального потоков .....                              | 100 |
| 6.4. Энергетический (тепловой) КПД.....                                                   | 101 |
| 6.5. Тепловой баланс печи в неизотермическом режиме идеального перемешивания .....        | 101 |
| 6.6. Эксергия .....                                                                       | 105 |
| 6.7. Теоретические расчёты в энергосбережении.....                                        | 105 |
| 6.8. Энергетическая составляющая в себестоимости выпускаемой продукции .....              | 110 |
| ЛЕКЦИЯ 7. Основы теории горения углеводородного топлива .....                             | 114 |
| 7.1. Механизм реакции горения топлива.....                                                | 114 |
| 7.2. Состав продуктов горения .....                                                       | 119 |
| 7.3. Концентрационные пределы воспламенения (распространения пламени) .....               | 120 |
| 7.4. Условия полного сгорания пламени .....                                               | 121 |
| 7.5. Скорость горения и распространения пламени .....                                     | 126 |
| 7.6. Классификация и структура пламен .....                                               | 127 |
| 7.7. Механизм образования загрязняющих веществ при сжигании углеводородного топлива ..... | 128 |
| 7.8. Условия образования сажи, бензпирена при сжигании углеводородного топлива .....      | 133 |

## ЛЕКЦИЯ 1. Состояние топливно-энергетического комплекса в России и мире

### 1.1. Глобальные проблемы, стоящие перед человечеством в третьем тысячелетии

Сегодня в мире происходят грандиозные изменения, результаты которых будут определять жизнь человечества в течение всего XXI века. Часть этих изменений связана с дальнейшим развитием науки и наукоемких отраслей производства, другая часть - с геополитическими изменениями на международной арене. В результате распада Советского Союза и социалистического содружества экономическое и политическое лидерство в мире сосредоточилось в руках развитых стран Запада - так называемого золотого миллиарда. В этих странах проживает менее миллиарда человек, или немногим более 15% населения Земли, однако они потребляют 80% мировых ресурсов. Такое положение создает предпосылки нового глобального конфликта, первым проявлением которого многие аналитики считают события 11 сентября 2001 года в США. Тем не менее межгосударственные и межнациональные противоречия не могут остановить нарастающих процессов глобализации в экономической, финансовой и информационной сфере. Глобализация неизбежно ведет к политической интеграции и созданию новых региональных объединений, способных в перспективе потеснить нынешние сверхдержавы. Активнее всего эти процессы развиваются в Западной Европе, где к 2020 г. прогнозируется создание единого государства, которое по своему экономическому потенциалу будет занимать второе место в мире. Нарастают интеграционные процессы в других регионах - Северной и Южной Америке, Африке, странах АТР.

Создание региональных объединений может помочь решению трех важнейших проблем, стоящих сегодня перед человечеством.

#### *Первая из них - проблема перенаселения.*

Если в начале нашей эры на Земле проживали всего 250 млн человек, то к 1900 году мировое население выросло до 1600 млн, к 2002 г. - до 6220 млн. По прогнозам, в 2050 г. численность населения планеты может достичь 9,5 млрд человек, а в 2100 г. даже 12 млрд.

Таблица 1.1. Динамика роста численности населения Земли [1]

| Год                        | 1650 | 1750 | 1850 | 1950 | 1900 | 1920 | 1952 | 2000 | Прогноз на 2050 год |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------------------|
| Численность населения, млн | 545  | 728  | 906  | 1171 | 1608 | 1813 | 2409 | 6200 | 8000-10000*         |

\*Средняя оценка. По данным Отдела народонаселения при секретариате ООН

Такой прирост может оказаться катастрофическим для человечества:

большинство экспертов считают, что наша планета может обеспечить едой, пресной водой и минеральными ресурсами не более 10 млрд человек. По мнению многих гидрогеологов, в конце XXI века проблема с водой будет важнее топливной и энергетической. В ОАЭ литр питьевой воды уже стоит дороже литра нефти. По данным ООН, в мире существует около 200 районов для потенциальных конфликтов разного масштаба, в основе которых лежит водная проблема.

Другой, не менее серьезной для человечества остается *угроза глобальной экологической катастрофы*.

Продолжают развиваться такие тревожные процессы, как загрязнение рек и морей промышленными отходами, истребление диких животных, вырубка лесов. В тропических лесах, являющихся главными «зелеными легкими» планеты, ежегодно вырубается до 15,7 млн гектаров. Результатом вырубки часто становится расширение пустынь - Сахара за последние полвека поглотила 650 тысяч км<sup>2</sup> или территорию, равную Франции. Исчезновение привычных условий обитания ведет к вымиранию животных и растений. Изменения угрожают и климату планеты.

С 1970-х годов ученые заговорили о *глобальном потеплении* - средняя температура выросла почти на 1 градус. Главной причиной этого стал *парниковый эффект, вызванный массовым выбросом в атмосферу углекислого газа* - продукта промышленности и транспорта. Еще одно тревожное явление - так называемые озоновые дыры в земной атмосфере, виновниками которых считают хлористые соединения, которые прежде использовались в производстве аэрозолей и холодильников.

В 1997 г. в Киото, Япония, 84 государства подписали протокол, по предотвращению глобального потепления климата посредством снижения антропогенных выбросов парниковых газов индустриальными странами и установления рамочных ограничений на эти выбросы.

*Согласно Киотскому протоколу*, эти страны обязались сократить с 2008 по 2012 г. свои выбросы, в среднем на 8%. С 2013 года будут введены новые обязательства. С момента подписания протокола к нему присоединились еще около 20 стран, однако он до сих пор не подписан рядом ведущих государств, включая США и Россию. В ближайшие 15 лет выбросы углекислого газа обещают вырасти вчетверо, что требует дальнейших мер по их сокращению. Экологические организации предлагают радикальный вариант - свести к минимуму сжигание углеводородного топлива, заменив его экологически чистыми видами горючего. Эффективная борьба с загрязнением окружающей среды возможна лишь при объединении усилий всех стран мира и формировании целостного экологического мышления.

Третьей важнейшей проблемой, стоящей перед современным человечеством, является *энергетическая*.

Мало обеспечить человека пищей, водой, жильем, одеждой и многими другими жизненно важными потребностями, необходимо также уметь покрывать быстро растущее энергопотребление. Сегодня в мире ежегодно потребляется около  $1,05 \cdot 10^{18}$  калорий (120 ПВт-ч), что эквивалентно

непрерывному расходу энергии приблизительно в 13 ТВт. Примерно столько же производят 13 000 атомных электростанций мощностью 1 ГВт. По мере роста численности населения планеты, развития стран и достижения более высокого уровня жизни ожидаемый спрос на энергию возрастет к 2025 г. до 21 ТВт, а к 2050 г. даже до 30 ТВт (рис. 1.1-1.3, табл. 1.2).

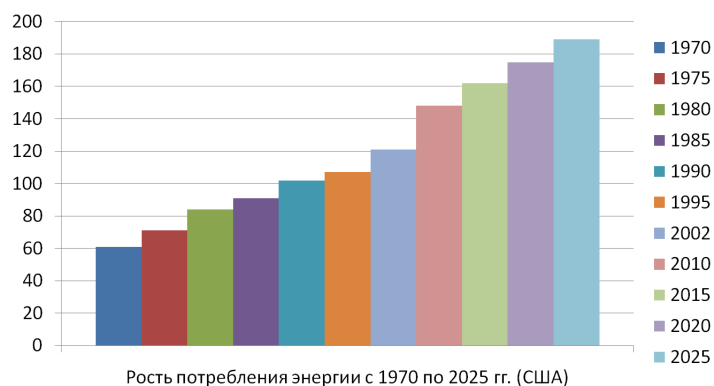


Рис. 1.1. Рост потребления энергии с 1970 по 2025 гг. (По данным Управления по энергетической информации при Министерстве энергетики США.) [1]

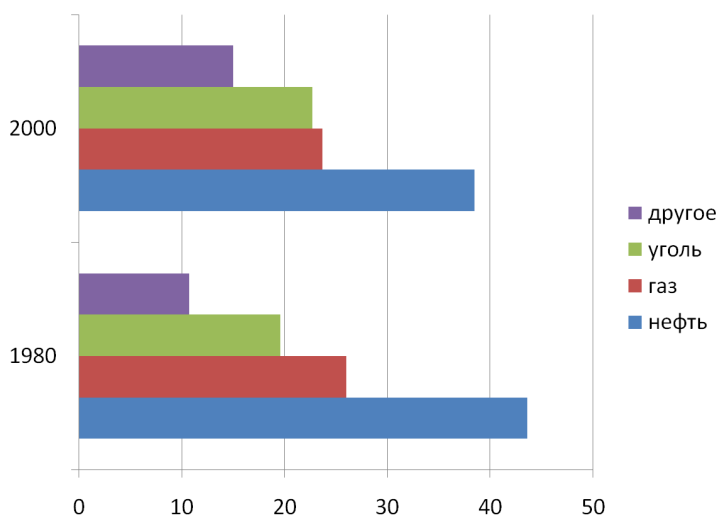


Рис. 1.2. Доля различных источников в энергопотреблении США (%) (По данным Бюро переписи США) [1]

Таблица 1.2. Доля различных источников в энергопотреблении США (%). (По данным Бюро переписи США) [1]

| Источник энергии                  | 1960  | 1970 | 1980 | 1990 | 2000 |
|-----------------------------------|-------|------|------|------|------|
| Нефть                             | 44,1  | 43,5 | 43,0 | 39,8 | 38,5 |
| Природный газ                     | 27,5  | 32,1 | 26,0 | 22,9 | 23,7 |
| Уголь                             | 21,8  | 18,1 | 19,6 | 22,8 | 22,7 |
| Атомная энергия                   | 0,002 | 0,35 | 3,5  | 7,3  | 8,1  |
| Реки, геотермальные воды, солнце, | 6,6   | 6,0  | 7,2  | 7,4  | 6,9  |

|             |  |  |  |  |  |
|-------------|--|--|--|--|--|
| ветер и др. |  |  |  |  |  |
|-------------|--|--|--|--|--|

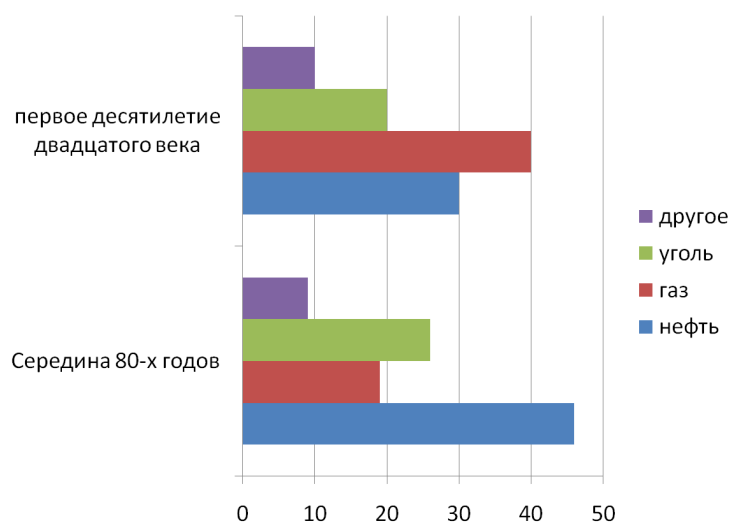


Рис. 1.3. Доля различных источников в энергопотреблении России

## 1.2. Структура мирового производства энергоресурсов

*Настоящее время*

В табл. 1.3 приведены данные по энергетическим ресурсам, из которых видно, что на долю углеводородов нефти и газа, как источников энергии, приходится более половины (63%) всех добытых и выработанных энергоресурсов, а доля органических видов топлива в энергетическом балансе превышает 87%. Из табл. 1.3 следует, что экономия 1% энергоресурсов эквивалентна почти 97 млн. т. топлива.

### Мировое производство энергии

Таблица 1.3

| Виды энергии                        | Годы |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                     | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 |
| Природный газ, млрд. м <sup>3</sup> | 2235 | 2239 | 2290 | 2352 | 2436 | 2493 | 2528 |
| Нефть и газовый конденсат, млн. т   | 3373 | 3470 | 3539 | 3462 | 3601 | 3581 | 3557 |
| Уголь, млн. т                       | 2306 | 2309 | 2259 | 2139 | 2130 | 2239 | 2379 |
| Энергия атомных электростанций*     | 545  | 541  | 551  | 571  | 585  | 601  | 611  |
| Энергия гидро-электростанций *      | 580  | 587  | 596  | 601  | 616  | 585  | 592  |

\* Млн. т нефтяного эквивалента.

Из представленных данных видно, что более 80% энергетических ресурсов приходится на природные ископаемые, в том числе углеводородные. Поскольку более 90% нефти и газа используются как топливо, то предложенная идея курса представляется вполне обоснованной.

Таблица 1.4. Доля отдельных источников энергии в мировом энергобалансе [2]

| Период        | Мускульная энергия человека | Органические вещества | Древесина | Уголь | Нефть | Природный газ | Водная энергия | Атомная энергия |
|---------------|-----------------------------|-----------------------|-----------|-------|-------|---------------|----------------|-----------------|
| 50000 до н.э. | 100                         | -                     | -         | -     | -     | -             | -              | -               |
| 2000 до н.э.  | 70                          | 25                    | 5         | -     | -     | -             | -              | -               |
| 1000 н.э.     | 10                          | 20                    | 70        | -     | -     | -             | -              | -               |
| 1990          | -                           | 16                    | 16        | 65    | 3     | -             | -              | -               |
| 1935          | -                           | 13                    | 8         | 55    | 16    | 3             | 5              | -               |
| 1972          | -                           | -                     | 10        | 32    | 34    | 18            | 5              | 1               |
| 2000          | -                           | -                     | 1         | 28    | 43    | 19            | 4              | 5               |

Таблица 1.5. Запасы и добыча нефти и газа в мире [2]

| Регион, страна     | Запасы нефти, млн т | Добыча нефти, млн т |            | Запасы газа, млрд м3 | Добыча газа, млрд м3 |          |
|--------------------|---------------------|---------------------|------------|----------------------|----------------------|----------|
|                    |                     | Всего               | в т.ч. ГЖК |                      | Общая                | Товарная |
| Северная Америка   | 28240               | 492,8               | 116,1      | 7075                 | 872                  | 740,5    |
| Канада             | 24465               | 141                 | 25         | 1700                 | 202                  | 168,5    |
| США                | 3775                | 351,8               | 91,1       | 5375                 | 670                  | 572      |
| Латинская Америка  | 18556               | 508,9               | 44,4       | 8198,1               | 196,3                | 122,1    |
| Западная Европа    | 2587,3              | 310                 | 31,2       | 5088,7               | 298,7                | 281,8    |
| Восточная Европа   | 249                 | 10,8                | 1,3        | 473                  | 25,6                 | 24,6     |
| СНГ                | 24905,5             | 473,5               |            | 55348                | 744,3                |          |
| Россия             | 18700               | 379,6               |            | 46800                | 595,3                |          |
| Северная африка    | 7304                | 184,5               | 33,6       | 8140                 | 171,8                | 104,6    |
| Тропическая Африка | 6166                | 187,6               | 11,4       | 5258                 | 53,7                 | 17,4     |
| Ближний Восток     | 101752,6            | 1042,6              | 79,4       | 59836                | 347,7                | 207,4    |

|                           |          |        |       |          |        |       |
|---------------------------|----------|--------|-------|----------|--------|-------|
| Южная, Юго-Восточная азия | 3550     | 180,8  | 32,3  | 7660     | 248,9  | 203,8 |
| Восточная Азия            | 16       | 161,2  | 6,7   | 1617     | 36,6   | 35,7  |
| Австралия и Океания       | 651      | 39,4   | 11,2  | 2750     | 48,1   | 39,1  |
| Всего в мире              | 200677,4 | 3563,5 | 367,6 | 160985,8 | 3044,7 | 2521  |

В мире все взаимосвязано и взаимозависимо. Рассмотрим обеспеченность мировой экономики энергией и природным углеводородным сырьем. В средствах массовой информации и специализированных изданиях нередко обсуждаются энергетический, нефтяной и экологический кризисы. Неужели ситуация с энергией и топливом настолько беспроблемна?

Известно, что третьей проблемой, стоящей перед человечеством, является энергетическая. Потребление энергии в современном мире продолжает расти, в то время как запасы основных энергоносителей – нефти и газа – сокращаются или растут недостаточно быстро. Это иллюстрируют следующие рис. 1.4.

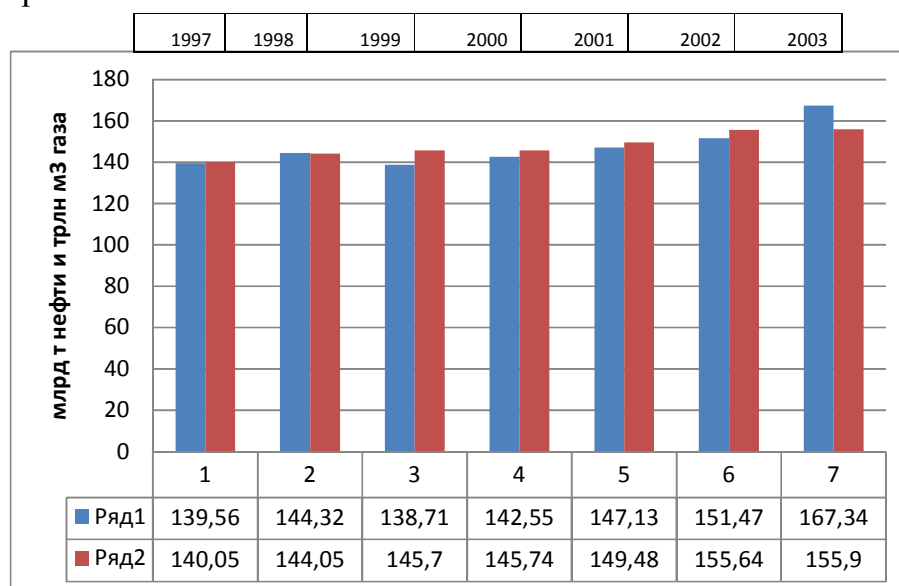


Рис. 1.4. РОСТ РАЗВЕДАННЫХ ЗАПАСОВ НЕФТИ И ГАЗА [2]

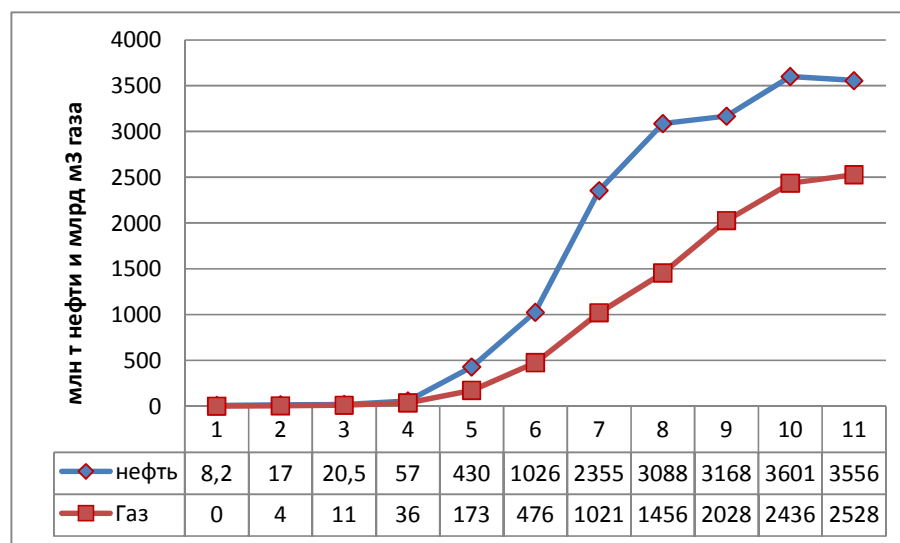


Рис. 1.5. Добыча нефти и газа в мире с 1860 по 2002 гг. [2]

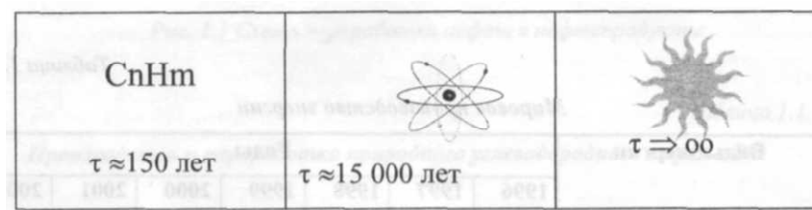


Рис. 1.6 Запасы различных видов энергии на Земле [3]

### Прогноз потребления энергоресурсов и их потенциал в земных недрах

На рис. 1.6 приведены энергетические ресурсы и время, в течение которого люди могут ими воспользоваться для поддержания современного жизненного уровня. По данным ЮНЕСКО среднестатистическое годовое потребление энергии на Земле в расчете на человека составляет около 2 кВт·ч.

Из рис. 1.6 видно, что открытых запасов природных углеводородов хватит примерно на 150 лет.

На рис. 1.7 схематично показана литосфера Земли и приведены средние значения глубин, на которых залегают разведанные природные углеводороды: нефть, газовый конденсат и газ. Видно, что неразведанные запасы вышеназванных полезных ископаемых составляют большую часть земных недр.



Рис. 1.7 Средняя глубина эксплуатационных скважин при добыче нефти, газоконденсата и газа [3]

#### *Потенциальные ресурсы углеводородного сырья*

Анализ свидетельствует о большом потенциале земных недр для дальнейшей добычи УВ. Стратегия развития отраслей ТЭК во многом определяется потенциальными ресурсами углеводородного сырья и возможностями их освоения. Для прогноза развития ресурсной базы в период с 2003-2100 год использованы следующие данные:

- мировые извлекаемые запасы нефти (по состоянию на 2003 г.) – 177 млрд т;
- за счёт открытия месторождений на суше (труднодоступные районы, ловушки на глубинах 5-7 км) прогнозируется прирост запасов – 50 млрд т;
- за счёт открытия месторождений на континентальном шельфе – 200 млрд т;
- за счёт увеличения коэффициента извлечения нефти (от 0,3 в настоящее время до 0,4 в 2050-2100 годы) – 100 млрд т;
- доказанные запасы битуминозных песчаников в Канаде – 23,6 млрд т;
- за счёт освоения битуминозного сырья (геологические ресурсы более 700 млрд т) – 400 млрд т;
- за счёт освоения месторождений горючих сланцев (геологические ресурсы 550 млрд т) – 5 млрд т;

В 2003 году добыча нефти составила 3,6 млрд т. При увеличении в 2100 году в два раза средняя добыча в течение ста лет для прогноза может быть принята как 5 млрд т / в год. Таким образом, планируется извлечь 500 млрд т условного топлива. По прогнозу прироста запасов такая цифра вполне реальна – по оценкам она составляет более 600 млрд т.

Газ:

- мировые извлекаемые запасы нефти (по состоянию на 2003 г.) – 162 трлн м<sup>3</sup>;
- за счёт открытия месторождений на континентальном шельфе– 300 трлн м<sup>3</sup>;
- за счёт открытия месторождений на больших глубинах (труднодоступные районы, ловушки на глубинах 5-7 км)прогнозируется прирост запасов – 100 трлн м<sup>3</sup>;
- за счёт метана угольных месторождений – 40 трлн м<sup>3</sup>;
- за счёт освоения газогидратов – 50 трлн м<sup>3</sup>.

В 2002 году добыча нефти составила 2527,6 млрд м<sup>3</sup>. К 2100 году прогнозируется добывать 7500 млрд м<sup>3</sup>. При средней годовой добыче газа в 5 трлн м<sup>3</sup> разведанных на сегодня запасов хватит на 140 лет. 600 млрд т

Не умаляя значения экономического фактора на рынке топлива и энергии, вызванного соотношением предложения-спроса, из рис. 1.6 и 1.7 можно сделать достаточно оптимистический вывод. Возникающие время от времени энергетические, нефтяные и топливные кризисы пока еще определяются не ограниченностью природных ресурсов, а, скорее всего, обусловлены исчерпанием возможностей существующих технологий разведки, разработки, добычи, переработки, транспорта, хранения и использования топливных и энергетических ресурсов природных углеводородов.

### 1.3. Тенденции развития мировой энергетики

К началу третьего тысячелетия нефть и природный газ по-прежнему остаются «кровью» мировой экономики и основой энергетики подавляющего большинства стран мира. В свою очередь, энергетика является одной из основных отраслей народного хозяйства любой страны, показателем ее экономической мощи. Сохранение и рациональное использование запасов энергии - необходимое условие развития экономики не только отдельных государств, но и всего мира. Современную энергетическую ситуацию в мире можно назвать относительно благополучной благодаря открытиям новых месторождений ископаемого топлива, совершенствованию энергетических технологий, более эффективному применению рыночных регуляторов. Но что будет дальше? Как скажется на мировой экономике неизбежное сокращение, а в перспективе и полное истощение запасов нефти и газа?

*В конце XX века мировое энергопотребление характеризовалось тремя главными особенностями.*

Во-первых, значительно сократились темпы роста потребления энергии, а душевое потребление в развитых странах с начала 80-х гг. практически перестало расти, несмотря на общий рост мировой экономики в полтора раза. В силу этого прервалась традиция предшествующих двух

столетий, в соответствии с которой среднедушевое потребление удваивалось примерно каждые 50 лет [2]. Тенденции, складывающиеся в мире в последние 2-3 десятилетия, показывают совершенно определенное снижение темпов прироста потребления энергоресурсов. Так, за период с 1963 по 1973 г. прирост мирового энергопотребления составил 2,6 млрд тонн условного топлива, а за последующее десятилетие - всего 1,7 млрд. Особенно сильно снизились темпы в промышленно развитых странах. Средний ежегодный прирост потребления в мире составил 1%, в США - 0,4%, в странах Западной Европы и Японии - 0,25%. Переломным в мировом изменении темпов прироста энергопотребления стал 1970 год, когда произошло резкое повышение цен на нефть и многие страны приступили к реализации энергосберегающих программ [4].

*Во-вторых, нарушилась наблюдавшаяся в течение последних ста лет периодичность смены энергоресурсов*, когда новый, более качественный ресурс в течение 30-50 лет активно вытеснял предыдущий, достигая почти двух третей общего производства энергии. Так, биомассу вытеснил уголь, на смену которому пришли нефть и газ, которые, в свою очередь, стали вытесняться атомной энергией. Однако в 80-е годы процесс этот практически остановился, и его перспективы все еще остаются неясными.

*Третьей особенностью является быстрая глобализация энергетики.* Рост мощности энергосистем и их территориальная экспансия привели к появлению всеобщей системы нефтеснабжения, межконтинентальных электроэнергетических и газоснабжающих систем. В то же время меняется размещение мирового энергопотребления, которое прежде в значительной мере концентрировалось в развитых странах Европы и Америки. Если в 1975 г. эти страны потребляли почти 54% мировой энергии, то в 2000 г. их доля уменьшилась до 43%. Бурное промышленное развитие Китая, Индии, ряда стран Азии и Латинской Америки привело к резкому росту энергопотребления, что угрожает еще более быстрым истощением энергоресурсов, а также масштабным загрязнением окружающей среды. Ожидается, что к 2020 г. на развивающиеся страны будет приходиться до 53% мирового потребления энергии.

Несмотря на почти трехкратное увеличение производства энергии за счет использования водных и ядерных источников, их доля в мировом энергобалансе остается незначительной - примерно 8% в 2002 г. По прогнозу Международного энергетического агентства, при сохранении современных тенденций в мировой энергетике в период до 2020 г. глобальное потребление первичных энергоресурсов может возрасти на 65%. Доля ископаемых видов топлива в мировом энергобалансе к 2020 г. должна сократиться до 76%. В структуре потребления первичной энергии в Европе к 2015 г. планируется сократить долю нефти с 42% (2000 г.) до 38%, в основном за счет роста доли природного газа с 22 до 27%.

На сегодняшний день среднедушевое потребление в мире составляет около 2 тонн условного топлива в год, а в ближайшие десятилетия достигнет 2,5-3,5 т. В этом случае мировое энергопотребление должно будет возрасти

до 15,5-18,5 млрд т условного топлива в год.

Получение энергии путем сжигания энергоносителей требует их значительного расхода. Но и уголь, и газ, и нефть относятся к ископаемым источникам топлива, которые формировались многие миллионы лет с использованием громадного количества биомассы.

Сжигая уголь, нефть и газ, люди используют вековые запасы энергии, полученной от Солнца и аккумулированной в земле в виде мощных угольных и нефтяных пластов. Но все эти запасы невосполнимы и в конце концов будут исчерпаны, тем более что темпы их добычи и использования постоянно растут. Так, например, за XX век, с 1900 по 2002 г., ежегодная добыча нефти возросла в 180 раз - с 22 до 3556 млн т.



Рис. 1.8. МИРОВЫЕ ЗАПАСЫ НЕФТИ % НА 2003 ГОД [2]

*Симптомом истощения мировых запасов углеводородов является перенос добычи с суши в море.*

35% нефти и 32% газа уже сейчас добываются со дна морских шельфов. В первые десятилетия XXI века можно ожидать, что постепенное оскудение мировых нефтяных запасов явится причиной острых противоречий и конфликтов между государствами.

*Развитые страны после первого нефтяного кризиса 70-х гг. прошлого столетия начали экономить свои запасы нефти.*

Например, Соединенные Штаты Америки практически законсервировали некоторые месторождения и предпочитают закупать нефть и нефтепродукты за рубежом, приберегая свои запасы на будущее (запасы США оцениваются в 3,7 млрд тонн, кроме того, около 2 млрд тонн нефти находится в недрах Мексики). Продукты переработки нефти наиболее удобны для использования их в современных энергетических установках и особенно в средствах транспорта. Поэтому этот вид энергоносителя в

последние десятилетия получил наиболее широкое распространение; за его счет человечество получает около 40 % энергии.

Остаются практически неиспользованными запасы так называемой тяжелой нефти, содержащейся в битуминозных песках. Ее мировые запасы достаточно велики и достигают 800 млрд тонн. Но, к сожалению, получение технического топлива из этого сырья очень сложно и дорого. Пески подвергают механическому дроблению, обрабатывают горячим паром и из полученной массы формируют сырье, которое затем может быть переработано в жидкое топливо, пригодное для использования в энергопотребляющих машинах. Тем не менее в будущем основные усилия могут быть направлены именно на добычу этой нефти. Первый шаг в этом направлении сделала Канада, в 2003 г. включившая свои запасы «тяжелой нефти» - 23,6 млрд т - в категорию доказанных.

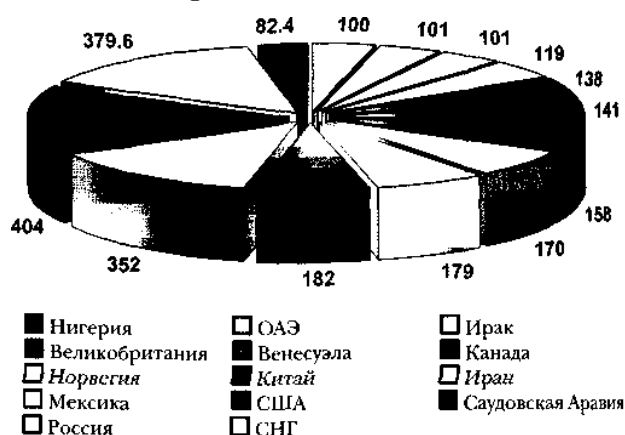


Рис. 1.9. [2]



Рис. 1.10. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДОБЫЧИ НЕФТИ В 2002 Г. (МЛН Т) [2]

Не подлежит сомнению, что и в XXI веке нефть и газ останутся основными энергоносителями.

*В этой связи особый интерес представляют прогнозы развития мировой*

*энергетической ситуации в течение данного периода.*

Один из таких прогнозов, опубликованный в мае 2003 г. американскими энергетическими аналитиками, предполагает, что мировое энергетическое потребление в период с 2003 по 2025 г., как ожидается, увеличится не менее чем на 58%, причем большая часть этого прироста произойдет не в развитых, а в развивающихся странах. Наиболее стабильными являются прогнозные тенденции устойчивого роста энергопотребления в развивающихся странах. И в первую очередь это страны Азии, где за указанный период спрос на энергию может возрасти более чем вдвое, а средний ежегодный прирост энергопотребления будет на уровне 3%. При этом на азиатские страны будет приходиться около 40% ожидаемого прироста всего мирового энергетического потребления и 69% от увеличения энергопотребления во всех развивающихся странах.

Большинство экспертов сходятся на том, что мировые цены на нефть по-прежнему будут оставаться достаточно высокими на протяжении ближайших лет. Это может быть связано со значительным объемом дополнительных поставок, которые потребуются для восполнения сильно истощившихся коммерческих запасов в развитых странах и для приведения баланса энергетических рынков в нормальное состояние после длительных перерывов в экспортных поставках нефти из Венесуэлы и Ирака. После 2004 г., как предполагается, цены могут вернуться к более умеренным средним значениям, приблизительно 24 долл. за барр., которые прогнозировались два-три года назад. В конце прогнозного периода, то есть к 2025 г., мировые цены на нефть, как ожидается, достигнут 27 долл. за барр. в фиксированных ценах 2001 г.

Мировое потребление нефти, как предполагается, будет увеличиваться на 1,8% в год на протяжении всего прогнозного периода и возрастет с 78 млн барр. в сутки в 2002 до 119 млн барр. в 2025 г. Такой ожидаемый прирост потребует увеличения производительности нефтедобывающей промышленности по сравнению с существующим уровнем на 42 млн барр, в сутки.



Рис. 1.11. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЩЕЙ ДОБЫЧИ ГАЗА В 2002 Г. (млрд м³) [2]

Основную часть дополнительной прибыли за счет роста добычи нефти при этом должны получить страны ОПЕК. Будут развиваться и поставки нефти из прочих государств. Наиболее перспективными считаются морские месторождения, расположенные в Каспийском бассейне, вдоль побережья Латинской Америки и в глубоководных зонах шельфа Западной Африки. При этом во всем мире будет последовательно возрастать объем глубоководных разведочных и эксплуатационных работ, в результате чего главными источникам нефтедобычи будут постепенно становиться различные участки шельфа Атлантического океана, примыкающие к берегам Южной Америки и Африки.



Рис. 1.12. Оборудование для извлечения нефтеносных песков в Канаде [2]

*Наиболее быстро среди всех первичных источников энергии, как ожидается, будет расти потребление природного газа.*

С 2003 по 2025 г. оно примерно удвоится и, по некоторым прогнозам, возрастет до 4,9 трлн м<sup>3</sup>. По своему суммарному тепловому эквиваленту природный газ опередит уголь в конечном использовании уже в 2005 г., а к 2025 г. - на 31%. Доля природного газа в общем объеме мирового энергетического потребления увеличится с 21% в 2002 г. до 24% в 2025 г., и он сможет обеспечить наибольшую часть прироста объема выработки электроэнергии. В результате доля газа в *структуре* ожидаемого прироста затрат первичных энергоносителей на выработку электроэнергии за рассматриваемый период может достигнуть 41 квадриллиона барр. условного топлива и составить 53% от общего увеличения первичных энергозатрат на электростанциях всех типов. Таким образом, рост потребления природного газа в мире будет происходить в результате его более широкого использования в качестве топлива для новейших, более экономичных газовых турбин тепловых электростанций.

*Использование угля, третьего по значению из первичных энергоносителей, будет увеличиваться.*

Эксперты считают, что потребление угля больше всего снизится в Западной Европе и странах СНГ, где он будет последовательно замещаться природным газом и атомной энергией. Вместе с тем уголь будет продолжать активно применяться в развивающихся странах Азии. В этом регионе только на Китай и Индию будет приходиться до 75% ожидаемого прироста использования энергетического угля во всем мире.

В настоящее время почти 55% угля применяется для выработки электроэнергии, и эта его роль будет оставаться ведущей и в будущем. На втором месте сохранится использование угля в сталелитейной промышленности. Во всех остальных секторах уголь будет продолжать активно вытесняться природным газом во всех странах, за исключением Китая. Причиной этого является стремительный рост энергетических потребностей китайской промышленности, наличие крупных внутренних запасов угля, ограниченный доступ к другим зарубежным источникам энергии. Будет сокращаться потребление кокса в большинстве стран мира в результате технологического прогресса в сталелитейной промышленности, растущего использования электропечей и продолжающегося процесса замены стали другими конструкционными материалами.

Что касается атомной энергии, то если в 2002 г. она обеспечивала 18% всего объема электроэнергии, производимой в мире, то к 2025 г. доля АЭС может снизиться до 12-15%, хотя на протяжении прогнозного периода в отдельных странах будут строиться новые атомные электростанции, использование атомной энергии в большинстве стран будет снижаться по мере завершения срока эксплуатации старых предприятий. Причинами этого являются более низкие показатели совокупной эффективности АЭС по сравнению с другими энергетическими технологиями, растущие опасения относительно безопасности реакторов, увеличение затрат на переработку и захоронение отработанного ядерного топлива, а также растущая угроза распространения атомных вооружений и использования радиоактивных веществ в террористических целях.

*Вместе с тем роль АЭС будет оставаться достаточно существенной.*

Этому будет способствовать модернизация существующих предприятий, а также более продолжительные сроки службы нового технологического и контрольно-измерительного оборудования. В отдельных странах будет продолжаться строительство новых АЭС. Как ожидается, к 2025 г. основная их часть (мощностью до 45 ГВт) будет введена в эксплуатацию в Китае, Индии, Японии и Южной Корее. В 2003 г. в развивающихся странах Азии продолжалось строительство 17 из 30 сооружаемых в мире новых АЭС. В том числе восемь из них строились в Индии, четыре - в Китае, по две - в Южной Корее и на Тайване и одна - в Северной Корее. Внедрение новых, более эффективных и безопасных типов реакторов может привести к новому росту доли АЭС в мировом энергобалансе.

Увеличение мощности гидроэлектростанций и использование других возобновляемых источников энергии, скорее всего, будет незначительным с

ежегодным темпом прироста вплоть до 2025 г. в 1,9%. Данные источники энергии не станут экономически конкурентоспособными по сравнению с минеральным топливом без существенной организационной, законодательной и экономической поддержки государства. Основная доля прироста возобновляемой энергии ожидается в результате ввода в строй новых крупных гидроэлектростанций, прежде всего в развивающихся азиатских странах. На протяжении всего периода до 2025 г. суммарное использование электроэнергии в мире будет возрастать. Потребление электроэнергии в Китае, как ожидается, возрастет почти в три раза и будет увеличиваться на 4,3% в год. В развитых странах темпы увеличения потребления электроэнергии окажутся значительно ниже и составят 1,7% в год из-за более низкого прироста населения и экономической активности, а также достигнутого насыщения рынков сбыта.

#### 1.4. Топливо-энергетический комплекс РФ

Снижение энергоемкости внутреннего валового продукта наблюдается в большинстве развитых стран мира во второй половине XX века. Но до 70-х годов энергосбережение было естественным эффектом научно-технического прогресса, изменения структуры производительных сил. В 70-90-х годах энергосбережение приобрело целевой характер в большинстве стран мира, ощутивших удары нефтяного кризиса.

Вместе с тем даже в промышленно развитых странах, где рыночная экономика чутко реагирует на любые изменения общеэкономической конъюнктуры, повышение энергетической эффективности потребовало больших затрат времени и средств. Потребовались многократные потрясения, прежде чем энергоемкость внутреннего валового продукта промышленно развитых стран начала снижаться [25].

В нашей стране нефтяной кризис наступил на полтора десятилетия позднее, когда остальной мир уже преодолел его последствия. Энергоемкость ВВП СССР / России по первичным энергоресурсам оказалась кратно выше, чем в основных западноевропейских странах и Японии. Государственная система регулирования экономики СССР оказалась неспособной к преодолению кризисных явлений в энергетике, а переходный период усилил их кризисом неплатежей. В результате в России не только не преодолены предпосылки кризиса в энергетике, но и продолжают попытки его не замечать [28]. ЛИТВАК

##### *Ресурсы России*

Роль Российской Федерации на Мировом энергетическом рынке достаточно велика, поскольку она обладает 13% мировых запасов нефти (в том числе 4,7% извлекаемые или 6,7 млрд. т) и 36% мировых запасов газа (48  $10^3$  млрд.  $m^3$ ).

К настоящему времени разведанность европейских районов России и Западной Сибири достигает 65-70% по нефти и 40-45% по газу, в то время как Восточная Сибирь и Дальний Восток разведаны только на 6-8%, а шельфы морей - лишь на 1%. Но именно на эти труднодоступные регионы приходится около 46% перспективных и более 50% прогнозных ресурсов нефти и около 80% природного газа. Среди шельфовых зон морей по перспективам на нефть наиболее высоко оцениваются Баренцево, Карское и Охотское моря. На шельфах этих морей высока вероятность открытия крупных и гигантских нефтяных и газоконденсатных месторождений.

Имеющиеся оценки позволяют утверждать, что объем неразведанных ресурсов нефти и газа России превосходит неразведанные ресурсы в любом отдельно взятом государстве мира, хотя уступает суммарному объему неразведанных ресурсов нефти всех стран Ближнего Востока.

Россия полностью обеспечивает не только свои внутренние потребности в топливе и энергии, но и в значительной степени обеспечивает своими ресурсами спрос на энергоносители сопредельных стран Восточной и Центральной Европы. Поставки энергоносителей из России покрывают 80% потребностей Украины, 100% - Прибалтики, свыше 50% - Восточной Европы. Спрос на российские энергоносители сохранится и в дальнейшем.

Однако экспорт российских энергоносителей даже на перспективу до 2015 года не превзойдет настоящего уровня и будет составлять 20-25% общего объема их производства с повышением доли продуктов более глубокой переработки.

#### 1.5. Энергосбережение – комплексная развивающаяся научно-техническая проблема

*Важнейшей задачей государственной энергетической политики является повышение эффективности использования всех видов энергии внутри страны*

с тем, чтобы экспорт, в основном, поддерживался добычей новых объемов нефти и газа, а за счет энергосбережения внутри страны, потенциал которого огромен.

До 40 % (460-540 млн. т у.т.) всех используемых в стране энергоносителей расходуется нерационально, в то время как каждый процент экономии энергоресурсов дает прирост национального дохода на 0,35-0,4 %.

Например, технологическое потребление газа, включая его потери, в ОАО «Газпром» достигает 10 %, что составляет около 50 млрд м<sup>3</sup>. Это в несколько раз превышает объем газа, который Газпром ежегодно планирует поставлять на экспорт по газопроводу «Голубой поток».

Расход энергии на единицу промышленной продукции в России в 2,5-5 раз выше, чем в индустриально развитых странах мира. Поэтому выгоднее экспортировать первичное топливо, а не конечную энергоемкую продукцию. Сохранение современного уровня энергоемкости промышленного

производства делает российскую продукцию неконкурентноспособной не только на мировом, но и на внутреннем рынке, поощряя тем самым импорт потребительских товаров и экспорт сырья.

Топливо-экономический комплекс производит более четверти всей промышленной продукции России, принося стране более половины всех валютных поступлений рациональным использованием энергии и топлива, энерго - и топливосбережением, конечная цель которых - достичь расхода топлива и энергии на единицу валового внутреннего продукта, характерного для наиболее развитых стран, путем разработки и использования передовых энергосберегающих техники и технологий.

### *Сегодня российское энергопотребление является избыточным более чем на треть*

Снижение энергоемкости внутреннего валового продукта наблюдается в большинстве развитых стран мира во второй половине XX века. Но до 70-х годов энергосбережение было естественным эффектом научно-технического прогресса, изменения структуры производительных сил. В 70-90-х годах энергосбережение приобрело целевой характер в большинстве стран мира, ощутивших удары нефтяного кризиса.

Вместе с тем даже в промышленно развитых странах, где рыночная экономика чутко реагирует на любые изменения общеэкономической конъюнктуры, повышение энергетической эффективности потребовало больших затрат времени и средств. Потребовались многократные потрясения, прежде чем энергоемкость внутреннего валового продукта промышленно развитых стран начала снижаться [8].

В нашей стране нефтяной кризис наступил на полтора десятилетия позднее, когда остальной мир уже преодолел его последствия. Энергоемкость ВВП СССР / России по первичным энергоресурсам оказалась кратно выше, чем в основных западноевропейских странах и Японии. Государственная система регулирования экономики СССР оказалась неспособной к преодолению кризисных явлений в энергетике, а переходный период усилил их кризисом неплатежей. В результате в России не только не преодолены предпосылки кризиса в энергетике, но и продолжают попытки его не замечать [5].

Сегодня российское энергопотребление является избыточным более чем на треть. Оно не сопровождается соответствующим производством продукта. При годовом производстве 1362 млн т.у.т. (1997 г.) «избыточной» является энергия в объеме 408 млн т.у.т. При средней цене условного топлива 250 руб./т.у.т. это соответствует 100 млрд руб. в год. Эти средства можно сэкономить [6].

Изобилие дешевых энергоресурсов за многие десятилетия породило негативную тенденцию энергорасточительности. Энергетическая составляющая себестоимости многих видов промышленной и сельскохозяйственной продукции снизилась до 1-3 %, что в значительной степени выключило стимулы к экономии энергоресурсов. В проекты целого ряда новых крупных заводов закладывалась старая технология, основанная на

перерасходе энергетических ресурсов. Большинство новых видов отечественной продукции имеет энергетические показатели значительно хуже зарубежных аналогов. Много в этом положении сохраняется и сегодня. Это затрудняет проведение реального энергосбережения, но увеличивает его потенциал.

## 1.6. Аспекты низкой энергетической эффективности

Важной причиной неблагоприятного положения в области энергоэффективности нашей экономики следует считать незаинтересованность на всех уровнях управления, на производстве, на рабочих местах и коммунальной сфере в экономном расходовании топливно-энергетических ресурсов. Незаинтересованность в экономии энергоресурсов потребителями естественна в энергосистемах и других энергоснабжающих организациях, поскольку это приводит к снижению объема реализации, а значит доходов и прибылей.

В свою очередь, потребители энергетических ресурсов не проявляют энтузиазма в их экономии, поскольку это, прежде всего, требует средств, усилий, знаний и умений. Кроме того, энергетическая расточительность производственных процессов вызвана значительной долей устаревшего оборудования, малоэффективными технологическими установками, высокой постоянной составляющей энергопотребления, связанной с общезаводскими расходами [7].

В настоящее время повсеместно крайне низка оснащенность энергопотребителей и энергетических сетей средствами учета, контроля, регулирования и автоматизации. Если электроэнергия еще является наиболее «измеряемым» энергоресурсом, то тепло и другие энергоресурсы средствами измерения оснащены совершенно недостаточно.

Не менее важной причиной низкого уровня энергосберегающей деятельности в нашей стране является почти полное отсутствие экономических и иных стимулов. Разработка и выпуск энергосберегающей продукции и продукции, имеющей улучшенные показатели энергопотребления, не поощряются. Именно эти свойства продукции могли бы стать решающими на рынке.

Из общей картины низкой энергетической эффективности выделяются ряд регионов Российской Федерации, реализовавшие серьезные энергосберегающие проекты. Так, Липецкая и Белгородская области завершили газификацию населенных пунктов, хотя собственных источников газа на их территориях нет. Регионы обладают значительными возможностями энергосбережения особенно в части нормативно-правового обеспечения.

В настоящее время экономика испытывает недостаток в квалифицированном управленческом и инженерном персонале в сфере энергосбережения. Средний возраст ИТР на предприятиях приближается к пенсионному. Не следует надеяться на то, что такой персонал удастся

переучить, научить новому энергосберегающему поведению. Необходимо осуществлять обучение, подготовку и переподготовку кадров, повышение их квалификации, ориентируясь на новые силы и новые интенсивные учебные программы [4].

### *Классификация энергосберегающей деятельности*

Деятельность значительного количества организаций в области энергосбережения и обсуждение результатов этой деятельности позволяет предполагать значительную неоднородность энергосберегающей деятельности по длительности, затратам, эффективности, трудоемкости. Это можно проиллюстрировать на примере рис. 1.13. В эту классификацию привлечено более четырех тысяч информационных материалов, публикаций, рекламных листовок и проектов, где приведены показатели эффективности. Использована нелинейная временная шкала. Это позволило отчетливо выявить три плотные группы инцидентов:

I группа - организационные (малозатратные) мероприятия, обеспечивают, в первую очередь, наведение технологического порядка, укрепление дисциплины производства, устранение элементарных потерь. Примерами таких мероприятий могут служить оснащение предприятий счетчиками энергии, нормирование удельных расходов электроэнергии по видам деятельности, разработка энергосберегающего графика работы агрегатов.

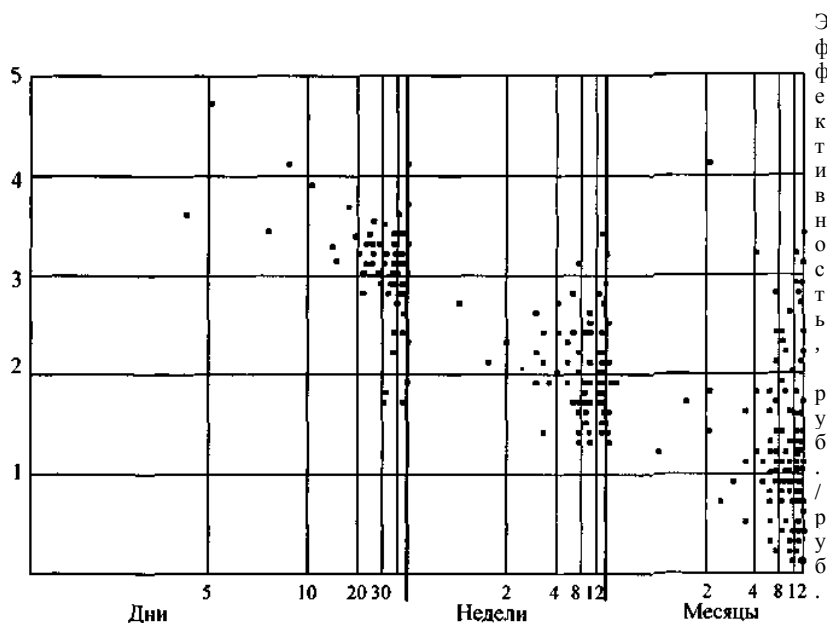


Рис. 1.13. Зависимость экономической эффективности энергосберегающих мероприятий от периода их реализации [4]

II Группа - технологические мероприятия, содержание которых состоит в технологическом переустройстве, рационализации производства без

крупных капиталовложений. Установки компенсации реактивной мощности, снижение мощности обогревателей вследствие утепления и ремонта, настройка и оптимизация регулирования агрегатов - характерные примеры технологического энергосберегающего поведения.

III группа - инвестиционные мероприятия, предусматривающие коренную реконструкцию производства, замену технологии. Например, установка опытного образца энергосберегающего оборудования. Для реализации этих мероприятий требуются внешние заимствованные средства. Срок окупаемости этих мероприятий часто оказывается большим.

Таким образом, наличие обособленных групп мероприятий требует оценивания экономической эффективности энергосбережения отдельно для каждой из них. Более того, попытки сравнивать эффекты от мероприятий из разных групп заведомо неправомерны, поскольку цели, задачи и результаты у них принципиально различны. Есть основание предполагать, что эти три группы представляют собой три несвязанные совокупности разнородных явлений или три разных явления, объединенных только условно одним названием «энергосбережение».

Опыт некоторых зарубежных стран в области энергосбережения свидетельствует о повсеместной многолетней традиции экономного использования топлива, энергии и энергоресурсов. Традиция эта возникла и укрепляется целым рядом сопутствующих обстоятельств;

- высокая цена топлива и энергии;
- высокая оснащенность средствами учета и регулирования;
- действенность механизма потребительского рынка энергии;
- законодательная и юридическая защита прав потребителей;
- высокая квалификация персонала энергоснабжающих организаций;
- мощная рекламная и разъяснительная кампания среди населения;
- законодательное обеспечение энергосбережения и эффективного

использования энергии и энергоресурсов.

Эта традиция сформировалась в энергосберегающий *образ метни*, что обеспечило более низкую энергоемкость валового национального продукта, чем в России, а потребление энергоресурсов на душу населения в коммунально-бытовой сфере выше российского из-за существенно разных уровней жизни. При этом значительная часть экономических ресурсов направляется не на закупку увеличивающегося количества расходуемых энергоресурсов, а на реализацию более тонких энергосберегающих технологий [9].

Все это вместе взятое свидетельствует о постепенном прорастании энергосбережения в самые укромные сферы человеческой деятельности - в производство, транспорт, связь, быт, средства массовой информации, в рекламу и т.п. Энергосбережение начинает формировать новый, экономный стиль жизни. Именно поэтому энергосбережение следует считать новым специфическим *явлением общественной жизни*.



РИС. 1.14. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ДЕРЕВО ПОНЯТИЙ [4]

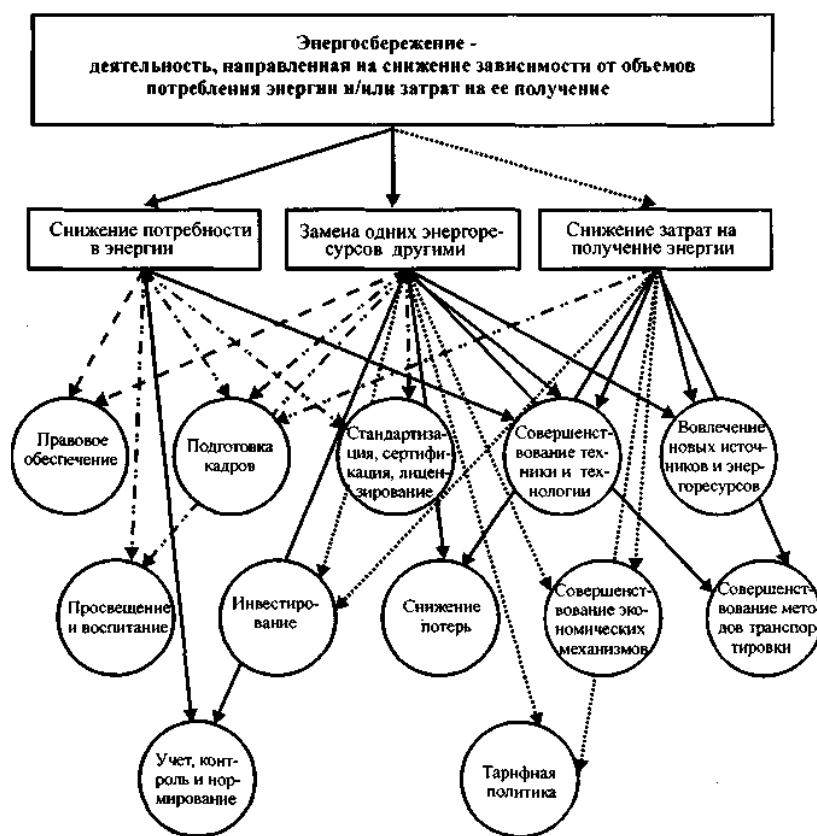


РИС. 1.15. СХЕМА ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ЗАДАЧ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ: [4]

- юридические
- информационные
- производственные
- экономические

## 1.7. Получение тепла и электроэнергии на теплоэлектростанции

На рис. 1.16 представлена принципиальная схема работы теплоэлектростанции. При сжигании природного газа в паровом котле (1) вырабатывается водяной пар с высокой температурой и давлением. Пар вращает паровую турбину (2), на валу которой установлен электрогенератор (3), вырабатывающий электроэнергию. Тепло отработанного пара утилизируется в конденсаторе-холодильнике (4), а сконденсированная вода вновь поступает в паровой котел. Продукты сгорания природного газа и (дымовые газы) после очистки от токсичных загрязняющих веществ ( $NO_x$ ,  $SO_2$ ,  $CO$ ,  $C$ , несгоревшее топливо) выбрасываются через дымовую трубу (5) в атмосферу.

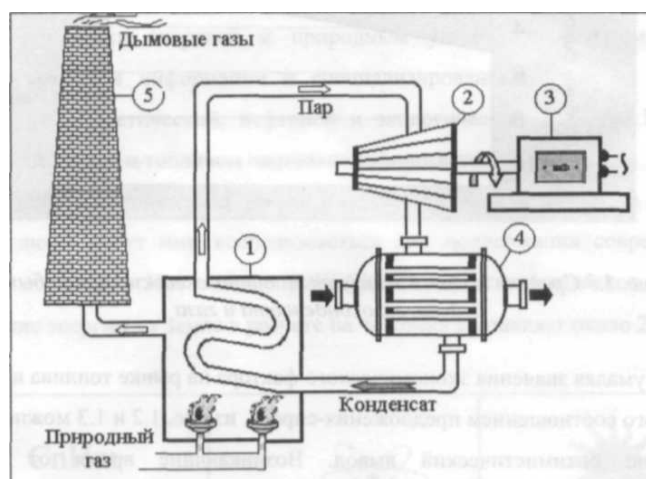


Рис. 1.16. Принципиальная схема работы ТЭС

Таким образом, для преодоления мировых энергетических кризисов необходимо создавать и использовать новые энергоэффективные и энергосберегающие технологии в энергетике и производстве, на транспорте и в повседневной жизни.

## **ЛЕКЦИЯ 2. Состояние топливно-энергетического комплекса в России и мире**

### **2.1. Нормативно-правовая база энерго- и ресурсосбережения**

Важной, если не решающей составляющей комплекса антикризисных мер, которые осуществляются, и будут осуществляться в ближайшее время, является энергосберегающая политика. Работа в этом направлении ведется особенно интенсивно в последние несколько лет, и она будет вестись все возрастающими темпами, так как энерго- и ресурсосбережению альтернативы нет.

Энергосбережение – начальный этап структурной перестройки всех отраслей хозяйства страны.

Необходимо создать такие условия, которые бы определяли интерес к энергосбережению всех участников процесса – органов власти, энергоснабжающих организаций, потребителей, финансовых структур и т. д.

Для этого требуется нормативно-законодательная основа деятельности, которая имеет следующий иерархический вид:

- Конституция Российской Федерации;
- Гражданский Кодекс Российской Федерации и Кодекс РСФСР об административных правонарушениях;
- Федеральные законы, принимаемые Государственной Думой РФ;
- Указы Президента РФ;
- Постановления и решения Правительства РФ;
- Региональные законы и Постановления (решения) администрации регионов;
- Постановления и решения муниципальных образований;
- Приказы и распоряжения руководителей предприятий и организаций всех форм собственности.

Конституция Российской Федерации, принятая 12 декабря 1993 года, разделила полномочия между федеральными и иными органами власти. К местному самоуправлению относится ведение, использование и распоряжение муниципальной собственностью, право устанавливать местные налоги и сборы.

#### **2.1.1. Законодательство РФ об энергосбережении**

Законодательство РФ об энергосбережении состоит из Федерального закона «Об энергосбережении» № 28 от 03.04.96 г. (в ред. Федерального закона от 05.04.2003 № 42-ФЗ) и принимаемых в соответствии с ним других

федеральных законов, иных нормативных правовых актов РФ, а также законов и иных нормативных правовых актов субъектов РФ по вопросам энергосбережения, принимаемых в соответствии с договорами по разграничению полномочий между органами государственной власти РФ и органами государственной власти субъектов РФ.

Федеральный закон «Об энергосбережении» регулирует отношения, возникающие в процессе деятельности в области энергосбережения, в целях создания экономических и организационных условий для эффективного использования энергетических ресурсов.

В Федеральном законе используются следующие понятия:

**энергосбережение** - реализация правовых, организационных, научных, производственных, технических и экономических мер, направленных на эффективное использование энергетических ресурсов и на вовлечение в хозяйственный оборот возобновляемых источников энергии;

**энергосберегающая политика государства** - правовое, организационное и финансово-экономическое регулирование деятельности в области энергосбережения;

**энергетический ресурс** - носитель энергии, который используется в настоящее время или может быть полезно использован в перспективе;

**вторичный энергетический ресурс** - энергетический ресурс, получаемый в виде побочного продукта основного производства или являющийся таким продуктом;

**эффективное использование энергетических ресурсов** - достижение экономически оправданной эффективности использования энергетических ресурсов при существующем уровне развития техники и технологий и соблюдении требований к охране окружающей природной среды;

**показатель энергоэффективности** - абсолютная или удельная величина потребления или потери энергетических ресурсов для продукции любого назначения, установленная государственными стандартами;

**непроизводительный расход энергетических ресурсов** - расход энергетических ресурсов, обусловленный несоблюдением требований, установленных государственными стандартами, а также нарушением требований, установленных иными нормативными актами, технологическими регламентами и паспортными данными для действующего оборудования;

**возобновляемые источники энергии** - энергия солнца, ветра, тепла земли, естественного движения водных потоков, а также энергия существующих в природе градиентов температур;

**альтернативные виды топлива** - виды топлива (сжатый и сжиженный газ, биогаз, генераторный газ, продукты переработки биомассы, водоугольное топливо и др.), использование которого сокращает или замещает потребление энергетических ресурсов более дорогих и дефицитных видов.

Энергосберегающая политика государства в соответствии с Федеральным законом основана на следующих принципах:

- приоритет эффективного использования энергетических ресурсов;
- осуществление государственного надзора за эффективным использованием энергетических ресурсов;
- обязательность учета юридическими лицами производимых или расходуемых ими энергетических ресурсов;
- включение в государственные стандарты показателей энергоэффективности;
- сертификация топливозэнергопотребляющего, топливозэнергосберегающе-го оборудования, материалов, конструкций, транспортных средств, а также энергетических ресурсов;
- сочетание интересов потребителей, поставщиков и производителей энергетических ресурсов;
- заинтересованность производителей, поставщиков и потребителей в эффективном использовании энергетических ресурсов. Энергопотребляющая продукция любого назначения, а также энергетические ресурсы подлежат обязательной сертификации на соответствующие показатели энергоэффективности.

При добыче, производстве, переработке, транспортировке, хранении и потреблении энергетических ресурсов показатели их эффективного использования, а также показатели расхода энергии на обогрев, вентиляцию, горячее водоснабжение и освещение зданий, иные показатели энергопотребления производственных процессов в установленном порядке включаются в соответствующую нормативно-техническую документацию.

Требования, устанавливаемые в области энергопотребления государственными стандартами, техническими нормами и правилами, являются обязательными для выполнения на всей территории РФ.

### 2.1.2. ФЦП «Энергоэффективная экономика»

Разработана и утверждена Правительством РФ Федеральная целевая программа «Энергоэффективная экономика», рассчитанная на 2002-2005 годы и на перспективу до 2010 г. К 2005 г, энергоемкость ВВП намечено снизить на 13,4% и к 2010 г. на 26% по отношению к 2000 г.

Уровень и масштаб производства различного углеводородного сырья и топлива огромны и в РФ, и в мире измеряются тыс. млн. т нефти и газового конденсата и тыс. млрд. м<sup>3</sup> природного газа (см. табл. 1.1)

Таблица 1.1. Производство и переработка природного углеводородного сырья в РФ

| Сырье                               | Годы |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                     | 1996 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 |
| Природный газ, млрд. м <sup>3</sup> | 575  | 591  | 590  | 584  | 581  | 598  | 620  |
| Нефть и газовый конденсат, млн. т   | 293  | 303  | 305  | 323  | 348  | 380  | 421  |
| Переработка нефти, млн. т           | 176  | 164  | 169  | 179  | 178  | 185  | 190  |

## 2.2. Новая техническая политика в области энергетики

Региональная энергетическая политика будет учитывать принципиальные различия условий энергоснабжения и структуры топливно-энергетического баланса различных зон страны – северных, южных, центральных районов европейской части России, Урала, Сибири, Дальнего Востока и районов Крайнего Севера.

Новая техническая политика в области энергетики ориентируется на:

- коренное повышение экономической и энергетической эффективности всех стадий добычи, преобразования, распределения и использования энергетических ресурсов;
- отказ от чрезмерной централизации энергоснабжения и эффективную деконцентрацию источников энергии с приближением их к потребителям энергии;
- экологическую и аварийную безопасность источников энергии и надежность энергоснабжения потребителей;
- разработку качественно новых технологий и технических средств для устойчивого развития энергетики;
- экологически чистых угольных электростанций;
- безопасных атомных электростанций;
- эффективных технологий использования новых источников энергии, добычи и переработки углеводородного сырья.

Главным средством достижения целей и реализации приоритетов энергетической стратегии является формирование энергетического рынка, контролируемого государством с помощью:

- ценовой и налоговой политики, обеспечивающей постепенный переход к ценам на топливо, соответствующим в качестве верхнего предела ценам мирового рынка, а нижнего – ценам самофинансирования предприятия;

- последовательного формирования конкурентной среды в энергетике путем создания полноценных хозяйственных субъектов рынка и рыночной инфраструктуры;
- совершенствования законодательства и разработки системы нормативных актов в виде энергетического кодекса РФ, регулирующего взаимоотношения субъектов энергетического рынка между собой и с органами государственного управления.

### 2.3. Энергетические обследования предприятий

В целях оценки эффективного использования энергетических ресурсов и снижения затрат потребителей на топливо - и энергообеспечение проводятся энергетические обследования.

Энергетические обследования эффективности использования ТЭР проводят:

- потребители ТЭР (собственные внутренние обследования);
- энергоаудиторские организации (работающие по контракту);
- органы надзора и контроля над эффективностью использования ТЭР.

Объектами энергетического обследования являются:

- производственное оборудование, машины, установки, агрегаты, потребляющие ТЭР, преобразующие энергию из одного вида в другой для производства продукции, выполнения работ (услуг);
- технологические процессы, связанные с преобразованием и потреблением топлива, энергии и энергоносителей;
- процессы, связанные с расходом ТЭР на вспомогательные нужды (освещение, отопление, вентиляцию).

Обязательным энергетическим обследованиям подлежат организации независимо от их организационно-правовых форм и форм собственности, если годовое потребление ими энергетических ресурсов составляет более шести тысяч тонн условного топлива или более одной тысячи тонн моторного топлива. Энергетические обследования организаций, если годовое потребление энергетических ресурсов составляет менее шести тысяч тонн условного топлива, проводятся по решению органов исполнительной власти субъектов

Российской Федерации, ответственных за координацию работ по эффективному использованию энергетических ресурсов.

По этому определению большинство предприятий нефтяной и газовой отраслей подлежат обязательным энергетическим обследованиям. Фактически это означает создание на предприятии системы энергоменеджмента.

Так, например, целью энергетического обследования на ООО «Саратов-оргсинтез» является установление показателей эффективности использования энергетических ресурсов, выработки экономически

обоснованных мероприятий по энергосбережению, составление топливно-энергетического баланса и энергетического паспорта.

Энергетическое обследование включает следующие виды работ:

- анализ динамики энергопотребления предприятия;
- оценку структуры энергопотребления по основным производствам и определение показателей энергоэффективности;
- анализ систем коммерческого и технического учета всех видов потребляемых энергоносителей;
- анализ системы электроснабжения и энергоемких электропотребляющих установок в том числе:

- электроснабжения предприятия;
- режимов работы трансформаторных подстанций;
- режимов потребления электроэнергии по цехам;
- производственного освещения;
- оценка параметров качества электроэнергии;
- разработка мероприятий по экономии топлива, тепла и электроэнергии;
- составление топливно-энергетического баланса;

- обследование систем снабжения предприятия паром, теплом, водой, холодом, воздухом по производствам;

- диагностика теплотребляющих установок;
- составление энергетического паспорта предприятия.

Федеральный закон определяет также экономические и финансовые механизмы энергосбережения.

Финансирование федеральных и межрегиональных программ в области энергосбережения осуществляется за счет средств государственной финансовой поддержки федерального бюджета, средств бюджетов соответствующих субъектов РФ, средств российских и иностранных инвесторов, а также за счет других источников в порядке, установленном законодательством РФ, законами и иными нормативными правовыми актами субъектов РФ.

В целях стимулирования эффективного использования энергетических ресурсов осуществляется установление сезонных цен на природный газ и сезонных тарифов на электрическую и тепловую энергию, а также внутри различных дифференцированных тарифов на электрическую энергию.

Федеральным законом определены основные направления международного сотрудничества в области энергосбережения:

- взаимовыгодный обмен энергоэффективными технологиями с иностранными и международными организациями;
- участие российских организаций в международных проектах в области энергосбережения;

- согласование показателей энергоэффективности, предусмотренных государственными стандартами РФ, с требованиями международных стандартов, а также взаимное признание результатов сертификации. Залогом успеха при решении вопросов энергосбережения в любой отрасли служит комплексный подход к решению проблемы. При этом должны быть объединены усилия различных организаций всех уровней - от руководства соответствующего министерства или объединения до персонала, эксплуатирующего оборудование.

Комплексный подход к решению данной проблемы требует решения следующих вопросов:

- нормативно-правовое обеспечение энергоснабжения отрасли, включая разработку концепции и программы энергосбережения;
- организация энергетических обследований и паспортизации предприятий отрасли;
- разработка информационно-аналитической системы энергосбережения отрасли;
- организация научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области энергосбережения;
- организация подготовки и переподготовки кадров и специалистов в области энергосбережения;
- финансирование программы энергосбережения;
- нормирование потребления энергоресурсов;
- организация контроля и учета энергопотребления;
- создание региональных центров энергосбережения, сертификации и сервисных услуг;
- развитие международного сотрудничества.

Федеральный закон «Об энергосбережении» предусматривает проведение обязательных энергетических обследований. Связывая практику энергосбережения с принудительным анализом состояния и работоспособностью энергетических установок, законодательство устанавливает необходимость внешнего, независимого, компетентного и конфиденциального обследования предприятия. Такое сочетание свойств этой непростой операции может быть достигнуто при следующих условиях:

- обследование проводится по правилам, построенным на основе объявленной государственной энергосберегающей политики;
- бригада экспертов комплектуется из лиц, профессионально обученных, имеющих достаточный стаж практической, научной, инженерной деятельности;
- результаты энергетического обследования не могут являться основанием для применения санкций, за исключением случаев, определенных действующим законодательством;
- оплата труда экспертов, проводящих обследование, должна осуществляться в юридически независимой организации по заранее согласованным ставкам;

- сведения, полученные экспертами в ходе обследования, не должны передаваться третьей стороне иначе, как с согласия обследуемого предприятия;

- персонал обследуемого предприятия оказывает максимальное содействие в работе бригады экспертов;

- программа обследования согласовывается сторонами и утверждается региональным управлением Госэнергонадзора;

- обучение экспертов должно осуществляться по программам, утвержденным территориальным управлением Госэнергонадзора.

Зарубежная практика выработала многочисленные организационные формы деятельности, направленной на подробный анализ возможностей и мер экономии энергии и энергоресурсов. Чаще всего эта деятельность обозначается термином «энергоаудит». Не говоря уже о том, что в русском переводе этот термин теряет содержательный смысл (от латинского audio - слышу), его не следует применять, поскольку банковско-бухгалтерская сфера использует этот термин для обозначения проверки, ревизии, анализа бухгалтерских документов. В Германии, Дании, Финляндии и других странах существует определенное количество консалтинговых фирм, осуществляющих энергоаудиторскую деятельность, заключающуюся в консультировании работников фирм по методам и средствам экономии энергии.

Энергетическое обследование представляет собой значительно более широкий круг работ, включающий и приборные измерения, и балансовые испытания установок. Возможно применение близких по содержанию терминов, используемых далее:

- энергетический обзор;

- энергетическая экспертиза;

- анализ энергетической эффективности;

- анализ использования и качества энергии;

- оценка потенциала экономии энергии и энергоресурсов.

Энергетическое обследование, таким образом, следует определить как деятельность, направленную на системный поиск возможностей повышения эффективности использования энергоресурсов и финансовых затрат в процессе добычи, производства, передачи и потребления энергии. Разумеется, содержание энергетического обследования определяется его программой, длительностью и глубиной.

Для классификации задач энергетического обследования и технологии ее проведения целесообразно использовать универсальную схему (рис. 2.1).

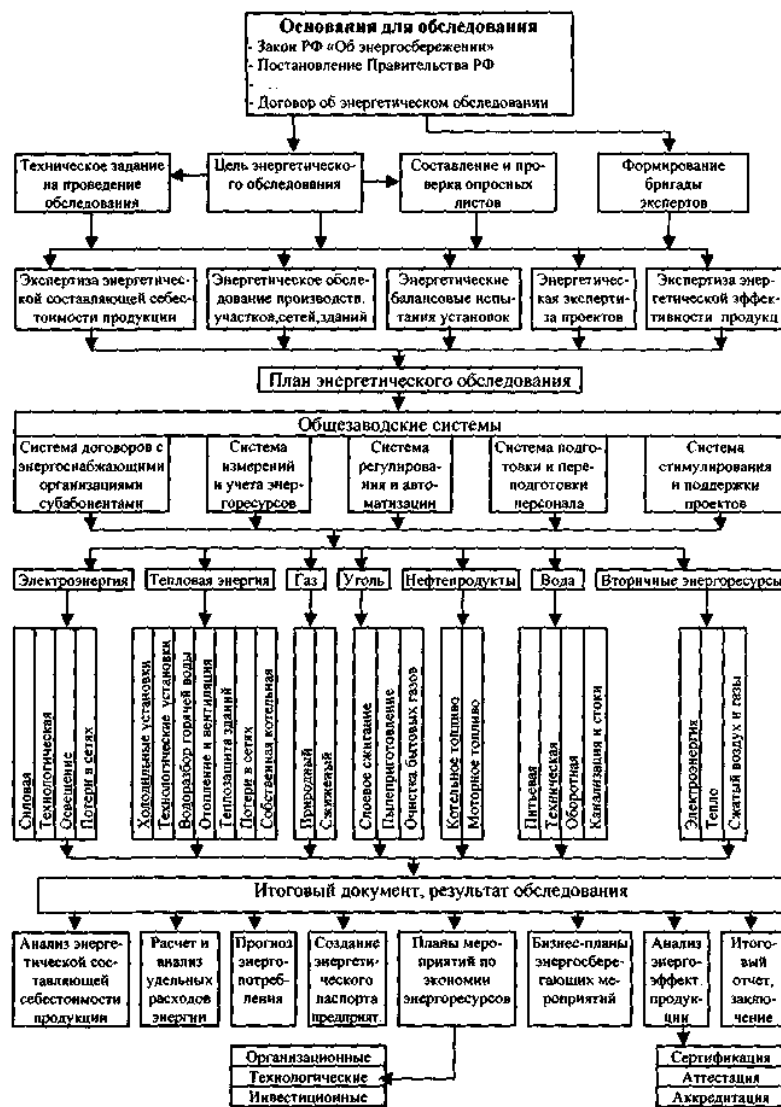


Рис. 2.1. Универсальная схема энергетических обследований

Основанием для проведения энергетического обследования предприятий, организаций любой формы собственности, связанных с добычей, транспортировкой, использованием топливно-энергетических ресурсов в материальном производстве, сфере услуг или коммунально-бытовом комплексе, являются Закон Российской Федерации «Об энергосбережении» и Постановление Правительства РФ «О неотложных мерах по энергосбережению».

## 2.4. Энергетический баланс и потенциал энергосбережения

Формирование экономических, хозяйственных, производственных, информационных и иных механизмов реализации политики энергоэффективности предусматривает в качестве основы энергетический баланс объекта. При этом не особенно существенны характер и объемы

потребления энергоресурсов. Гораздо важнее полнота и содержательность описания энергетического баланса.

#### 2.4.1. Составление энергетического баланса региона

В последние годы внимание к вопросам теории и практики разработки топливно-энергетических балансов возросло в связи с обострением мирового энергетического кризиса, изысканием путей наилучшего использования природных источников энергии и непрекращающимся ростом потребления всех видов энергии и топливно-энергетических ресурсов.

Разработки государственных, общенациональных балансов и планов комплексного развития энергетической, газоснабжающей, нефтеснабжающей систем, выполненные известными школами: Институтом систем энергетики им. Л.А.Мелентьева (СЭИ), Центральным экономико-математическим институтом АН СССР, Энергетическим институтом им Г.М.Кржижановского и др., - остаются научно-методической основой анализа и оптимизации топливно-энергетического хозяйства страны.

Балансовый метод анализа топливно-энергетического хозяйства по отдельным видам энергоресурсов - электроэнергии, теплу, газу и т.д., а также сводных балансов обеспеченности народного хозяйства страны известен достаточно давно и применяется весьма широко.

Метод изучения количественных характеристик процессов преобразования топливно-энергетических ресурсов, балансовые испытания энергетических установок реализуют по существу тот же самый подход - сопоставление затраченных и отпущенных энергоресурсов.

Построение топливно-энергетических балансов для определения целесообразных пропорций добычи и использования всех видов топливно-энергетических ресурсов страны целом и отдельных отраслей (металлургии, химии, электроэнергетики) составляло и составляет важную задачу планирования развития страны, а балансовые испытания установок позволяли сформировать **нормативы, лимиты** потребления энергии и энергоресурсов соответствующих объектов.

При всех сложностях составления государственных (национальных), отраслевых балансов и балансов предприятий технология их разработки все-таки отработана многолетним применением достаточно хорошо. Значительной проблемой остается формирование **территориально-ориентированных топливно-энергетических балансов**: региональных, балансов муниципальных образований, бассейновых балансов, линейных балансов и т.д. В качестве примера в табл. 2.2 представлен сводный баланс Томской области за 2000 год.

Необходимость разработки и анализа регионального топливно-энергетического баланса возникает при создании региональной системы управления энергосбережением. Основные принципы формирования региональных и иных территориально-ориентированных топливно-энергетических балансов заключаются в следующем:

а) баланс формируется на основе действующих форм государственной статистической отчетности; состав, периодичность и порядок представления материалов устанавливается администрацией;

б) баланс планируется, составляется и анализируется для подготовки управляющих решений органами управления региона;

в) баланс формируется в условиях открытого оптового федерального и потребительского регионального рынка электрической и тепловой энергии и конкурентного рынка топлива;

г) преобразование топливно-энергетического хозяйства региона осуществляется в направлениях:

- экономически обоснованного соотношения использования собственных энергоресурсов и ресурсов, поставляемых извне;

- повышения уровня технической готовности энергооборудования к несению нагрузки, обеспечивающей потребности региона;

- повышения способности предприятий ТЭК быстро наращивать производственные мощности;

Таблица 2.2. Сводный топливно-энергетический баланс Томской области за 2000 год в тыс. т. у. т. [4]

| Показатели                  | Нефть  | Газ    | Уголь | Дрова | Прочие: ма-<br>зут, дизтоп-<br>ливо, бензин | Электро-<br>энергия | Тепло  | Всего   |
|-----------------------------|--------|--------|-------|-------|---------------------------------------------|---------------------|--------|---------|
| 1                           | 2      | 3      | 4     | 5     | 6                                           | 7                   | 8      | 9       |
| Производство, тыс. т. у. т. | 6648   | 3024,6 | 0     | 102,1 | 100,5                                       | 561,2               | 1874,4 | 12310,9 |
| Отправлено на сторону       | 6482,7 | 700,9  | 0     | -     | 0                                           | 0                   | 0      | 7183,7  |
| Получено со стороны         | 0      | 0      | 2700  | -     | 294,7                                       | 1500,2              | 0      | 4495    |
| Остаток на складе           | 0      | 0      | -     | 0     | 0                                           | 0                   | 0      | 0       |
| Электростанции              | 0      | 0      | 0     | 0     | 0                                           | 521,6               | 904,8  | 1426,4  |
| В том числе-                |        |        |       |       |                                             |                     |        |         |
| Томскэнерго                 | 0      | 0      | 0     | 0     | 0                                           | 521,6               | 614,7  | 1136,3  |
| В том числе:                |        |        |       |       |                                             |                     |        |         |
| Томская ГРЭС-2              | 0      | 0      | 0     | 0     | 0                                           | 387,7               | 431,5  | 819,2   |
| Томская ТЭЦ-3               | 0      | 0      | 0     | 0     | 0                                           | 133,9               | 179    | 312,9   |
| ПРКТЭЦ-1                    | 0      | 0      | 0     | 0     | 0                                           | 0                   | 4,2    | 4,2     |
| Не входящие в состав        |        |        |       |       |                                             |                     |        |         |
| Томскэнерго:                |        |        |       |       |                                             |                     |        |         |
| Северская ТЭЦ и ЭС          | 0      | 0      | 0     | 0     | 0                                           | 940,2               | 290,1  | 1230,3  |
| Котельные                   | 0      | 0      | 0     | 0     | 0                                           | 0                   | 789,6  | 789,6   |
| В том числе:                |        |        |       |       |                                             |                     |        |         |
| промышленные                | 0      | 0      | 0     | 0     | 0                                           | 0                   | 553,5  | 553,5   |
| муниципальные               | 0      | 0      | 0     | 0     | 0                                           | 0                   | 236,2  | 236,2   |
| ДЭС, ДГС                    | 0      | 0      | 0     | 0     | 0                                           | 26,6                | 0      | 26,6    |
| Фактическое производство    | 6648   | 3024,6 | 0     | 102,1 | 100,5                                       | 561,2               | 1694,4 | 12130,9 |
| Статистическое расхождение  | 0      | 0      | 0     | 0     | 0                                           | 0                   | 180    | 180     |
| Собственные нужды           | 0      | -      | 0     | 0     | 0                                           | 74,2                | 13,5   | 87,7    |

|                                   |              |               |               |             |              |               |                |               |
|-----------------------------------|--------------|---------------|---------------|-------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| Отпуск в сеть                     | 0            | 0             | 0             | 0           | 0            | 1987,2        | 1681           | 3668,2        |
| <b>1</b>                          | <b>2</b>     | <b>3</b>      | <b>4</b>      | <b>5</b>    | <b>6</b>     | <b>7</b>      | <b>8</b>       | <b>9</b>      |
| Потери в сети                     | -            | 37            | -             | -           | -            | 313,8         | 98,5           | 449,4         |
| <b>Потребление</b>                | <b>1623</b>  | <b>2286,6</b> | <b>1666,8</b> | <b>91</b>   | <b>395,3</b> | <b>1748,3</b> | <b>2375</b>    | <b>8728,5</b> |
| Электростанции                    | 0            | 804,7         | 165,6         | 0           | 78,3         | 0             | 0              | 1048,7        |
| В том числе:                      |              |               |               |             |              |               |                |               |
| Томскэнерго                       | 0            | 804,7         | 165,6         | 0           | 78,3         | 0             | 0              | 1048,6        |
| В том числе:                      |              |               |               |             |              |               |                |               |
| Томская ГРЭС-2                    | 0            | 554,4         | 165,6         | 0           | 19,7         | 0             | 0              | 739,6         |
| Томская ТЭЦ-3                     | 0            | 246,2         | 0             | 0           | 61,3         | 0             | 0              | 307,5         |
| Томская ТЭЦ-1                     | 0            | 4,2           | 0             | 0           |              | 0             | 0              | 4,2           |
| Северская ТЭЦ                     | 0            | 0             | 909,8         | 0           | 0            | 0             | 0              | 909,8         |
| Котельные                         | 28,8         | 0             | 209,3         | 10,4        | 2,6          | 0             | 0              | 251,1         |
| В том числе:                      |              |               |               |             |              |               |                |               |
| промышленные                      | -            | 0             | 78,9          | 5,7         |              | 0             | 0              | 84,6          |
| муниципальные                     | -            | 0             | 130,4         | 4,7         |              | 0             | 0              | 135,1         |
| ДЭС, ДГС                          | 0            | 24,8          | 0             | 0           | 0            | 0             | 0              | 24,8          |
| <b>Конечное потребление</b>       | <b>136,5</b> | <b>1457,1</b> | <b>1415,3</b> | <b>91,7</b> | <b>314,3</b> | <b>1748,3</b> | <b>2276,5</b>  | <b>7439,8</b> |
| Промышленность                    | 95,6         | 1152,3        | 951           | 25,2        | 86,8         | 1085,4        | 759,4          | 4155,7        |
| В том числе:                      |              |               |               |             |              |               |                |               |
| топливная                         | -            | -             | -             | 0           | 0            | -             | 0              | -             |
| Строительство                     | -            | -             | -             | 0           | -            | 10,4          | 21,8           | 32,2          |
| Сельское хозяйство                | 14,4         | 39,3          | 21,2          | 3,9         | 46,1         | 64,9          | 82,1           | 271,9         |
| Транспорт                         | 13,2         | 91,6          | 17,8          | 0,4         | 64,2         | 96,6          | 65,7           | 349,4         |
| Население                         | 0            | 7,7           | 3,3           | 9,6         | -            | 365,9         | 1240           | 1626,5        |
| Сфера услуг и ЖКХ                 | -            | -             | -             | -           | -            | 16,9          | 83,7           | 100,6         |
| Прочие                            | 28,9         | 166,2         | -             | -           | 10,6         | 108,2         | 467,9          | 781,9         |
| <b>Фактическое потребление</b>    | <b>180,8</b> | <b>2286,6</b> | <b>2278,1</b> | <b>49,4</b> | <b>288,7</b> | <b>1748,3</b> | <b>2720,6</b>  | <b>9552,5</b> |
| <b>Статистическое расхождение</b> | <b>15,5</b>  | <b>0</b>      | <b>421,9</b>  | <b>41,7</b> | <b>24,6</b>  | <b>0</b>      | <b>-1026,2</b> | <b>-</b>      |

- диверсифицированности приходной части топливно-энергетического баланса;

- адаптивности предприятий, территорий и региона в целом к экстремальным ситуациям с энергоснабжением;

- создания необходимых резервов мощностей и пропускной способности сетей внутри региона;

- интенсивной энергосберегающей деятельности;

- совершенствования технического уровня эксплуатируемого оборудования.

Источниками первичных отчетных и прогнозных данных для составления топливно-энергетических балансов региона являются:

- энергетические организации;

- предприятия, добывающие энергоресурсы;

- предприятия других отраслей, имеющие в своем составе энергетические объекты;

- предприятия и организации всех отраслей экономики как потребители

энергоресурсов;

- государственные органы и организации регионального и муниципального уровня и территориальные органы федеральных государственных органов, выполняющие управляющие, регулирующие и контрольно-надзорные функции в энергетике;

- региональные органы государственной статистики.

Энергетический баланс региона составляется на основе форм федерального государственного статистического наблюдения, предусмотренных органами госстатистики и содержащих информацию о производстве, отпуске и потреблении электрической и тепловой энергии; добыче, транспорте и поставке энергоресурсов.

Определение экономически оправданных пропорций в развитии современного топливно-энергетического хозяйства, реализуемого в рыночных условиях, требует полного учета и анализа всей суммы энергетических потерь от добычи до полезного потребления всех видов топлива и энергии. Важность такого анализа полезных расходов определяется тем, что их рост повышает требования к экономии и заставляет искать способы сокращения потерь и утилизации вторичных энергетических ресурсов. Выявить эти потери возможно только при доведении анализа до стадии определения полезных расходов энергии всех видов [86]. Конечное полезное использование энергии может определяться исходя из следующих соображений:

- в осветительных системах полезно используемая энергия определяется по величине освещенности на рабочей поверхности;

- в транспортных системах - по величине произведенной транспортной работы;

- в силовых процессах - по количеству механической энергии конечного исполнительного механизма;

- в термических процессах - по теоретическому расходу энергии на нагрев, плавку, испарение и проведение эндотермических реакций;

- в отоплении, вентиляции, горячем водоснабжении - по количеству реально подведенного к потребителю тепла;

- в электрохимических процессах - по расходу энергии, теоретически необходимому для проведения процесса;

- в процессах хранения, переработки, преобразования и транспорта топлива и энергии - по количеству энергоносителя, получаемого после соответствующего преобразования.

#### 2.4.2. Потенциал энергосбережения

Энергия, запасенная в топливе (энергетический потенциал топлива), может быть извлечена при сжигании в топках котлов или иными физико-химическими преобразованиями. Выделяемую при этом *полезную* энергию сопровождают *потери*.

Полезный расход энергии любого процесса, установки, предприятия,

объекта можно определить через коэффициент полезного использования энергии:

где  $E_{\text{вн}}$  - энергия внешнего источника, подведенная к объекту.

Очевидно, потери энергии, имеющие место в процессе, в абсолютных единицах выражаются так:

и в относительных единицах:

Подобно тому, как это сделано в книге Ю.Н. Савенко и Е.О. Штейнгауза [86], для оценки технически и экономически оправданных значений коэффициентов полезного использования (КПИ) топливно-энергетических ресурсов на этапах жизненного цикла изменение энергетического потенциала может быть представлено так, как на рис. 2.2.

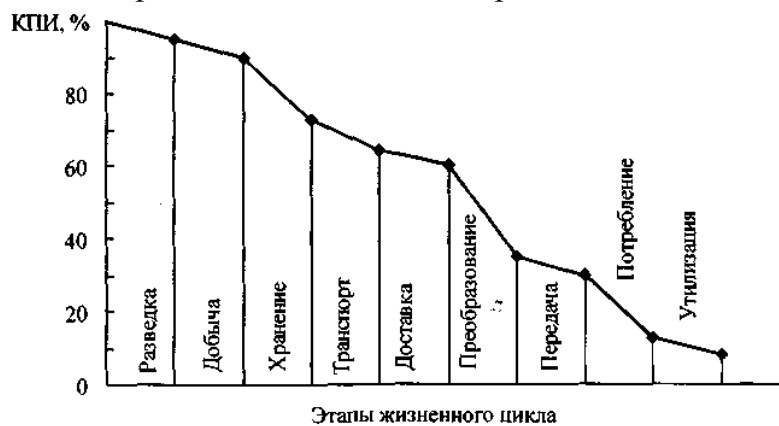


Рис. 2.2. Изменение энергетического потенциала топлива и энергии на этапах жизненного цикла энергоресурса

Наибольшие потери энергоресурсов имеют место при хранении, преобразовании и потреблении. Поскольку баланс - это сопоставление затраченной энергии и энергии полезной, то его составление может быть осуществлено двумя способами:

**Прямой баланс** энергии формируется, если удастся напрямую измерять подаваемую (затрачиваемую) энергию и энергию, полезно используемую в установке, объекте.

**Обратный баланс** составляется, если с большой достоверностью можно измерять потери энергии в объекте.

На основании сопоставления затрачиваемой и полезной энергии, выявления потерь делается вывод об эффективности или неэффективности преобразования энергии.

При этом, говоря о потерях энергии, необходимо иметь в виду различные

их категории:

- потери, связанные с осуществлением данного технологического процесса и зависящие от технического совершенства оборудования;

- потери в действующем процессе по сравнению с процессом, осуществляемом на более высоком научно-техническом уровне, известном в мировой и отечественной практике;

- потери, экономически оправданные при осуществлении технологического процесса на традиционном уровне и при действующем оборудовании;

- потери, экономически оправданные при осуществлении технологического процесса на передовом научно-техническом уровне путем модернизации и реконструкции оборудования и технологических схем и внедрения новых технологий;

- потери, связанные с разрегулированностью технологической схемы, с эксплуатацией оборудования в неоптимальных режимах;

- потери, связанные с использованием энергоресурсов низкого качества;

- потери, вызванные необходимостью поддерживать повышенный уровень надежности, безопасности, живучести и т.п.;

- потери, связанные с обеспечением повышенного комфорта, специфических условий труда, информационными и праздничными мероприятиями.

Таким образом, все потери энергии и энергоресурсов могут быть разделены на три неравные и нечетко определенные группы:

а) потери, связанные с несовершенством условий эксплуатации оборудования и требующие **организационно-регламентных** мероприятий для их устранения;

б) потери, связанные с несовершенством технологического процесса. Их ликвидация требует технического и *технологического переустройства* и рационализации в действующем оборудовании;

в) потери, связанные с несовершенством технологических схем и оборудования. Их ликвидация требует **коренной реконструкции** производства, замены технологии, освоения крупных инвестиций.

**Потенциал энергосбережения** показывает, какую долю энергии (энергоресурса) можно сохранить или полезно использовать, если произвести соответствующие переустройства действующей технологии (табл. 2.2.). Он характеризуется соотношением коэффициентов полезного использования энергии действующего и преобразованного (перспективного) технологического процесса [10].

Наиболее подробно техника составления баланса и выявления нерационального расходования (потерь) энергии и энергоресурсов разработана для **промышленных предприятий**, где энергетические балансы являются основным методом планирования и анализа использования энергоресурсов.

По своему назначению энергетические балансы предприятий делятся на плановые, фактические, отчетные, аналитические, нормализованные и

перспективные.

Таблица 2.3.

Оценка технико-экономических значений КПИ энергии ТЭР для предприятий промышленности [11]

| Виды процессов                         | Значения КПИ               |                      |             |           |                            |                      |             |           | Доля существующего к перспективному |
|----------------------------------------|----------------------------|----------------------|-------------|-----------|----------------------------|----------------------|-------------|-----------|-------------------------------------|
|                                        | Существующие               |                      |             |           | Перспективные              |                      |             |           |                                     |
|                                        | Генерация и преобразование | Транспорт и передача | Потребление | Суммарная | Генерация и преобразование | Транспорт и передача | Потребление | Суммарная |                                     |
| Двигатели внутреннего сгорания         | 87                         | 93                   | 20          | 16        | 90                         | 95                   | 25          | 21        | 0,72                                |
| Электропривод                          | 29                         | 85                   | 65          | 15        | 40                         | 90                   | 85          | 30        | 0,5                                 |
| Освещение                              | 29                         | 85                   | 20          | 5         | 29                         | 85                   | 40          | 10        | 0,5                                 |
| Централизованное теплоснабжение        | 78                         | 92                   | 85          | 60        | 85                         | 96                   | 95          | 77        | 0,78                                |
| Децентрализованное теплоснабжение      | 55                         | 93                   | 90          | 46        | 75                         | 97                   | 95          | 69        | 0,68                                |
| Высокотемпературн. топливные установки | 87                         | 90                   | 35          | 27        | 90                         | 92                   | 65          | 54        | 0,5                                 |

**Плановые** балансы являются основой планирования энергопотребления и разрабатываются исходя из заданной производственной программы и плановых удельных расходов энергии и энергоресурсов с учетом эффективности запланированных мероприятий по экономии энергии и снижению потерь.

**Нормализованные** балансы характеризуют достижимый уровень энергетического использования. Он разрабатывается путем изучения и нормализации потерь энергии и нерационального ее расходования при составлении и анализе фактического энергетического баланса.

**Отчетные** балансы предприятия предназначаются для обоснования масштабов и режимов энергопотребления в отчетном периоде.

**Аналитическая** форма отчетного энергетического баланса обеспечивает возможность углубленного анализа энергоиспользования в энергетических установках разных типов и назначений.

**Перспективные** энергетические балансы разрабатываются для обоснования перспективных направлений экономического развития систем энергоснабжения, реконструкции и перевооружения производства.

Использование различных, в том числе замещающих друг друга видов энергии или топлива вызывает необходимость составления материальных и энергетических балансов. Совокупность этих балансов принято называть

**топливно-энергетическим балансом.** Они выполняются как сводные и частные.

**Частные балансы** отдельных видов топлива, составляемые в натуральных объемных или весовых показателях, позволяют сформировать обобщенные потребности по количеству и качеству топлива. Поскольку ряд энергетических и технологических установок могут использовать только конкретные виды и сорта топлива определенного качества, то особое внимание должно уделяться составляющим балансов по отдельным видам или сопровождаться дополнением по структурам каждого вида. Пример баланса угля приведен в табл. 2.3.

При этом существенно охватить полный жизненный цикл топлива: разведку, добычу, хранение, транспортировку, доставку, преобразование, передачу и распределение, потребление, удаление и утилизацию отходов.

**Баланс электрической энергии** формируется как взаимная увязка потребности хозяйства в электроэнергии и обеспечение этой потребности различными электростанциями. Выражение расходной части баланса, зависящее в сильной степени от учетно-статистической базы, характеризует общую потребность в электроэнергии и распределение по отраслям хозяйства или по отраслевым комплексам: промышленности, строительству, сельскому хозяйству, транспорту и связи, коммунально-бытовому комплексу, сфере услуг и образованию, населению.

Т а б л и ц а 2.3 Баланс угля по Томской области, тыс. т.у.т [4]

| Показатели                  | Годы          |               |               |               |
|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                             | 1995          | 1998          | 1999          | 2000          |
| <b>Получено со стороны</b>  | <b>2769,2</b> | <b>3263,7</b> | <b>2670,3</b> | <b>2700</b>   |
| <b>Остаток на складе</b>    | <b>19,5</b>   | <b>187,9</b>  | <b>198,5</b>  | <b>-</b>      |
| Электростанции              | 382,9         | 763,8         | 485,8         | 165,6         |
| В том числе:                |               |               |               |               |
| Томскэнерго                 | 382,9         | 763,8         | 485,8         | 165,6         |
| В том числе:                |               |               |               |               |
| Томская ГРЭС-2              | 382,9         | 763,8         | 485,8         | 165,6         |
| Томская ТЭЦ-3               | 0             | 0             | 0             | 0             |
| Томская ТЭЦ-1               | 0             | 0             | 0             | 0             |
| Северская ТЭЦ               | 166,6         | 139,9         | 136,9         | 909,8         |
| Котельные                   | 595,51        | 379,5         | 357           | 209,340       |
| В том числе:                |               |               |               |               |
| промышленные                | 340,2         | 203,7         | 133,5         | 78,92         |
| муниципальные               | 255,3         | 175,8         | 223,5         | 130,419       |
| <b>Конечное потребление</b> | <b>1643,7</b> | <b>2168,4</b> | <b>1889,2</b> | <b>1415,3</b> |
| Промышленность              | 680,4         | 929,5         | 855,5         | 951           |
| В том числе;                |               |               |               |               |
| топливная                   | 41,9          | 23,8          | 27,8          | 21,2          |
| Строительство               | 50            | 13,9          | 18,1          | 17,8          |
| Сельское хозяйство          | 4,5           | 4,3           | 3,6           | 3,3           |

|                   |  |  |  |  |
|-------------------|--|--|--|--|
| Транспорт         |  |  |  |  |
| Население         |  |  |  |  |
| Сфера услуг и ЖКХ |  |  |  |  |
| Прочие            |  |  |  |  |

*Топливо-энергетический баланс* - обобщающая характеристика объемов добычи, переработки, транспорта, преобразования, распределения и потребления первичных и преобразованных видов топлива и энергии по всему жизненному циклу топлива и энергии.

Очевидно, составление такого баланса возможно только в единой системе измерения. В принципе, в качестве основы возможно принять любую единицу измерения топлива, энергии или работы. В СССР и в настоящее время в России применяется угольный эквивалент - условное топливо с теплотворной способностью 7000 ккал/кг. В США и других западных странах принят и рекомендован ООН *-нефтяной эквивалент* с теплотворной способностью 10 тыс. ккал/кг. Но здесь остается не вполне определенным эквивалент по электрической энергии гидравлических и атомных электростанций. Существует два противоречивых подхода:

- по методике ООН - 1 кВтч =125 г.у.т.;
- по методике МИРЭК - 1 кВт-ч =312 г.у.т.

Топливо-энергетические балансы в настоящее время охватывают и анализируют только те фазы топливо-энергетического хозяйства, которые поддаются непосредственному статистическому учету на современном уровне контрольно-измерительной техники и метрологии. Анализ баланса, состоящий в сопоставлении затрачиваемого топлива, энергии и полезного расхода в ходе преобразования, позволяет выявить потери топливо-энергетических ресурсов на каждом этапе добычи, переработки, распределения и обеспечивает получение достоверных характеристик эффективности топливо-энергетического хозяйства.

Топливо-энергетический баланс является отражением многообразных процессов в сложных энергетических комплексах, и эти процессы невозможно представить в форме линейной таблицы из-за необходимости характеризовать в ней многочисленные связи, объемы, качества разных видов топлива и энергии. Именно в связи с этим имеющиеся разработки табличных форм топливо-энергетических балансов страны, регионов, предприятий нельзя признать совершенными, поскольку в значительной степени они представляют собой

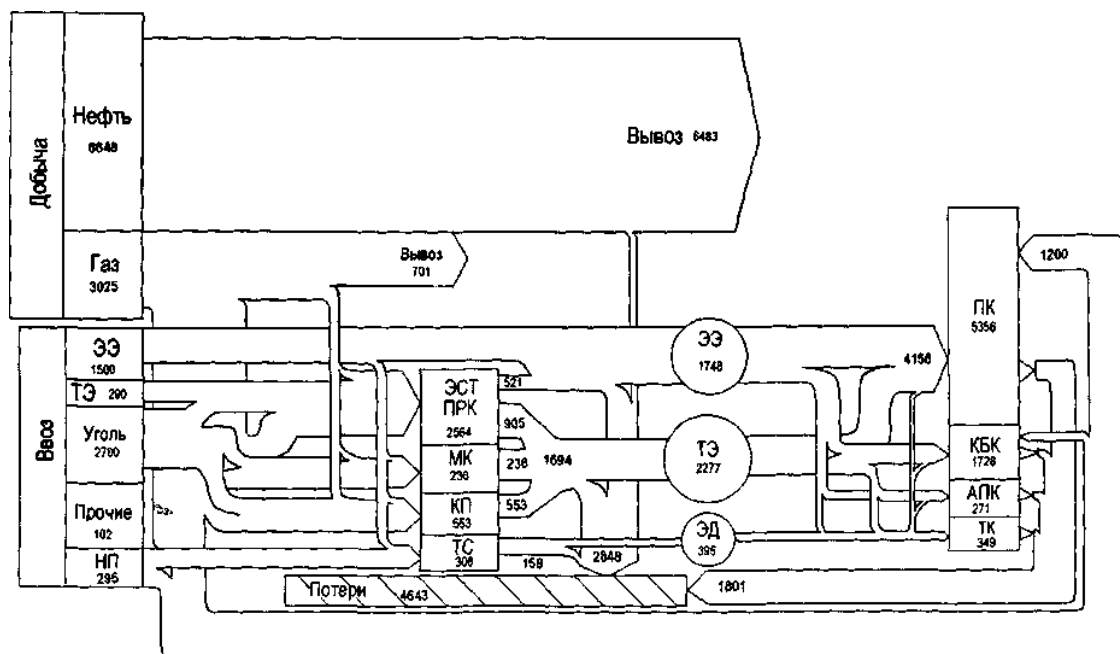


Рис. 2.3. Энергетический баланс Томской области. Условные обозначения: ЭЭ - электроэнергия; ТЭ - тепловая энергия; НП - нефтепродукты; ЭС - предприятия энергосистемы; МК - муниципальные котельные; КП - промышленные котельные; ТС - транспортные средства; ЭД - энергия движения; ПК - промышленный комплекс; КБК - коммунально-бытовой комплекс; АПК - агропромышленный комплекс; ТКС - транспортный комплекс и связь

механическое соединение балансов топлива, балансов электрической и тепловой энергии и вторичных энергоресурсов. Значительное облегчение понимания топливно-энергетического баланса, его внутренних связей и зависимостей дают структурные схемы топливно-энергетического баланса, изображаемые графически в виде *обобщающих диаграмм потоков энергии* (рис. 2.3.). В определенном смысле такие диаграммы дают отчетливое и наглядное представление о *морфологии* (внутреннем строении) топливно-энергетического баланса объекта.

#### 2.4.2. Анализ энергетического баланса

Составление и анализ топливно-энергетического баланса для территориально-ориентированных объектов позволяет:

- обосновать плановую потребность в топливе, электрической и тепловой энергии для осуществления жизнедеятельности населения и выполнения производственной программы;
- определить наиболее рациональные способы покрытия потребности в топливе и энергии, их объемах, номенклатуре и качестве,
- выявить излишние потери топлива и энергии и разработать меры по их устранению;
- установить нормативы энергопотребления;
- определить приоритетные меры по энергосбережению и наиболее экономичные направления совершенствования топливно-энергетического хозяйства;

- определить потенциал энергосбережения.

Построение топливно-энергетического баланса и его анализ осуществлены на базе данных по Томской области (табл. 4-6, 4-7). Для проверки методики выбор конкретного региона Российской Федерации не имеет существенного значения, но целесообразнее это делать на конкретных данных госстатистики [12].

Таблица 2.4. Потребление энергоресурсов в Томской области [4]

| Виды энергоресурсов          | Годы  |       |       |       |       |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                              | 1980  | 1985  | 1990  | 1995  | 2000  |
| Электроэнергия, млн кВт-ч    | 3144  | 4888  | 6101  | 6259  | 5464  |
| Тепловая энергия, тыс. Гкал  | 6889  | 11848 | 16759 | 10814 | 13236 |
| Газ, млн м'                  | 481.1 | 1410  | 1709  | 1515  | 1928  |
| Нефть и нефтепродукты, тыс.т | 33.6  | 120   | 69    | 464   | 604   |
| Уголь, тыс.т                 | 2129  | 1251  | 3707  | 2932  | 2948  |
| Прочие, тыс.т                | 2518  | 1915  | 1031  | 772   | 351   |
| Всего, тыс.т.у.т.            | 5895  | 6304  | 7356  | 7353  | 7440  |

Потребление энергоресурсов в регионе за 20 лет наблюдений изменялось в широких пределах по объему и по структуре. Наглядное представление о динамике структуры топливно-энергетического баланса можно получить, если отвлечься от абсолютной величины используемого энергоресурса и рассматривать его изменение относительно некоторой собственной базы (рис. 2.4) . За единицу принят уровень потребления 1980 года.

Наблюдается достаточно широкий диапазон изменения потребления энергоресурсов во времени. Общее изменение потребления составило 21 % за период с 1980 по 2000 г. Переломным периодом для энергетики области были годы с 1993 по 1997 г. Объемы потребления энергоресурсов в 2000 г. представлены на рис. 2.5, а структура суммарного потребления по видам энергоресурсов в 2000 г. представлена на рис. 2.6.

Электроэнергия и тепло из централизованных источников составляют почти половину всех потребляемых в области энергетических ресурсов - 47%. При этом производство электроэнергии на собственных тепловых электростанциях составило величину в 3 раза меньшую, чем ее покупается на федеральном оптовом рынке электроэнергии (табл. 2.5).

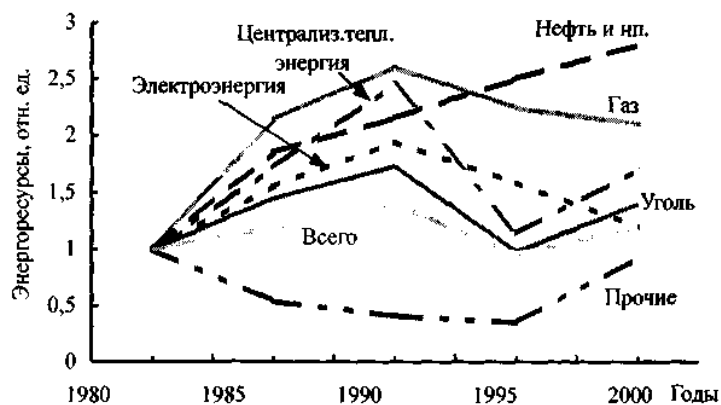


Рис. 2.4. Динамика относительного изменения потребления энергоресурсов [4]

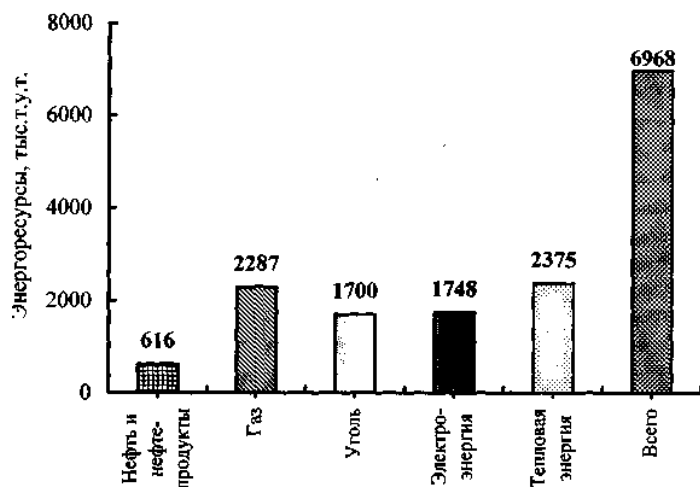


Рис. 2.5. Объемы потребления энергоресурсов в 2000 г. [4]



Рис.2.6. Структура потребления ресурсов в Томской области в 2000 г. [4]

Экономически это оправдано, так как цена электроэнергии на оптовом рынке меньше, чем собственная себестоимость. Половина объема потребляемой тепловой энергии произведена на электростанциях, другая - в котельных.

Очевидно, что совместное производство тепла и электроэнергии экономически выгоднее, но передача тепловой энергии на значительные расстояния, за пределы зоны экономической эффективности, может

полностью перекрыть все преимущества совместного производства. В этой связи оптимизация соотношения выработки тепла на источниках Томской области по-прежнему остается актуальной.

Динамика структуры потребления топлива и энергии в регионе за последние 20 лет характеризуется снижением потребления угля и интенсивным ростом потребления газа и электроэнергии со стороны (рис. 2.7).

Как долгосрочная тенденция, структура топливно-энергетического баланса в полной мере отражает социально-экономические условия региона. Производственно-хозяйственная деятельность предприятий, жизнь населения претерпели существенные изменения. И, естественно, они не могли не найти свое отражение в объемах и структуре топливно-энергетического баланса.

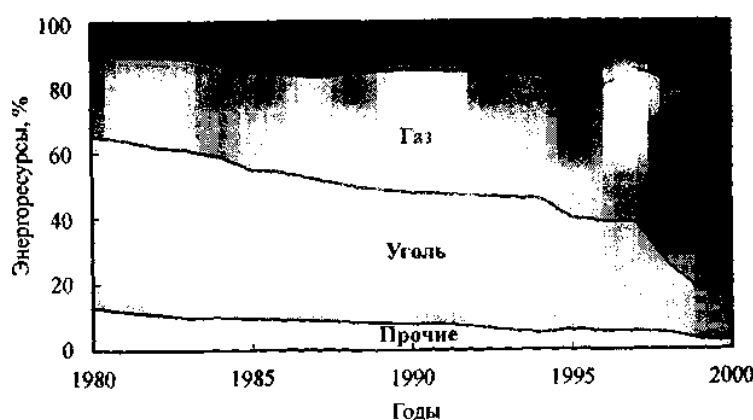


Рис. 2.7. Динамика структуры потребления ТЭР в Томской области, % [4]

Углубленное представление о структуре энергопотребления можно получить, рассматривая территориальное размещение объектов энергопотребления. Прежде всего, это касается муниципальных образований городов и районов региона (табл. 2.5) .

Таблица 2.5 Производственные и энергетические характеристики муниципальных образований Томской области [4]

| Муниципальные образования | Население, |      | Объем промышленно-го производства, % | Совокупный внут-ренний продукт, % | Потребле-ние энер-горесурсов, % | Доля ком-мунально-го потреб-ления |
|---------------------------|------------|------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
|                           | тыс. чел.  | %    |                                      |                                   |                                 |                                   |
| Александровский           | 11,4       | 1,19 | 0,17                                 | 0,18                              | 0,47                            | 0,14                              |
| Асиновский                | 49,2       | 5,12 | 0,68                                 | 0,98                              | 2,4                             | -                                 |
| Бакчарский                | 17,7       | 1,84 | 0,07                                 | 0,09                              | 0,68                            | 0,02                              |
| Верхнекетский             | 25         | 2,6  | 0,6                                  | 0,32                              | 1,1                             | 0,26                              |
| Зырянский                 | 18,5       | 1,92 | 0,05                                 | 0,04                              | 0,43                            | -                                 |
| Каргасокский              | 28,7       | 2,99 | 0,4                                  | 0,43                              | 0,86                            | 0,15                              |

|                |       |       |       |      |      |      |
|----------------|-------|-------|-------|------|------|------|
| Кожевниковский | 24,6  | 2,56  | 0,23  | 0,25 | 0,82 | -    |
| Колпашевский   | 54,6  | 5,68  | 0,92  | 0,97 | 2,31 | 0,02 |
| Кривошеинский  | 19,3  | 2,01  | 0,07  | 0,15 | 0,72 | 0,27 |
| Молчановский   | 19,8  | 2,06  | 0,23  | 0,2  | 0,65 | -    |
| Парабельский   | 16    | 1,66  | 0,25  | 0,16 | 0,53 | 0,28 |
| Первомайский   | 23,2  | 2,41  | 0,43  | 0,42 | 1,7  | 0,16 |
| Тегульдетский  | 9,3   | 0,97  | 0,05  | 0,05 | 0,35 | 0,17 |
| Томский        | 92,1  | 9,58  | 0,75  | 2,39 | 5,06 | -    |
| Шегарский      | 24,2  | 2,52  | 0,24  | 0,37 | 0,81 | -    |
| Чаинский       | 17,2  | 1,79  | 0,13  | 0,12 | 0,68 | -    |
| г. Томск       | 505,7 | 52,61 | 50,51 | 45   | 68,1 | 0,03 |
| г. Стрежевой   | 48    | 4,99  | 44,22 | 50,1 | 12,4 | -    |

Характеристики энергопотребления, объема промышленного производства и совокупного внутреннего продукта выражены в относительных единицах (процентах) по отношению к областным показателям. Соотношение этих характеристик показывает интенсивность энергоиспользования в соответствующих муниципальных образованиях.

Существенные различия удельного энергопотребления невозможно однозначно объяснить (табл. 2.6). Высокие удельные расходы в Бакчарском, Зырянском, Тегульдетском районах свидетельствуют о сравнительно низком развитии экономики, но при этом потребление энергоресурсов остается на прежнем уровне.

Т а б л и ц а 2.6 Удельное потребление энергоресурсов [4]

|                           | Удельное потребление энергоресурсов |                                    |                                        | Электро-<br>энергия на душу населения, кВтч/чел. | Тепловая энергия на душу населения, Гкал/чел. |
|---------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                           | на душу населения, кг у.т/чел.      | на единицу промышл. пр-ва, отн.ед. | на единицу совокупн. продукта, отн.ед. |                                                  |                                               |
| Муниципальные образования |                                     |                                    |                                        |                                                  |                                               |
| Александровский           | 1123                                | 2,76                               | 2,61                                   | 277                                              | 5,13                                          |
| Асиновский                | 1319                                | 3,53                               | 2,45                                   | 372                                              | 1,46                                          |
| Бакчарский                | 1045                                | 9,71                               | 7,55                                   | 1294                                             | 3,81                                          |
| Верхнекетский             | 1192                                | 1,83                               | 3,44                                   | 988                                              | 2,43                                          |
| Зырянский                 | 632                                 | 8,6                                | 10,7                                   | 1892                                             | 0,22                                          |
| Каргасокский              | 812                                 | 2,15                               | 2                                      | 793                                              | 2,63                                          |
| Кожевниковский            | 898                                 | 3,57                               | 3,28                                   | 4012                                             | 4,19                                          |
| Колпашевский              | 1145                                | 2,51                               | 2,38                                   | 388                                              | 1,15                                          |
| Кривошеинский             | 1005                                | 10,3                               | 4,8                                    | 1155                                             | 2,44                                          |
| Молчановский              | 889                                 | 2,83                               | 3,25                                   | 773                                              | 2,45                                          |
| Парабельский              | 906                                 | 2,12                               | 3,31                                   | 1494                                             | 0,89                                          |

|               |      |      |      |       |       |
|---------------|------|------|------|-------|-------|
| Первомайский  | 1987 | 3,95 | 4,05 | 1371  | 3,37  |
| Тегульдетский | 1011 | 7    | 7    | 559   | 1,96  |
| Томский       | 1486 | 6,75 | 2,12 | 1987  | 6,87  |
| Шегарский     | 905  | 3,37 | 2,19 | 1231  | 3,02  |
| Чаинский      | 1070 | 5,23 | 5,67 | 1372  | 3,27  |
| г. Томск      | 3644 | 1,35 | 1,51 | 2441  | 5,74  |
| г. Стрежевой  | 6989 | 0,28 | 0,25 | 23680 | 18,07 |

Муниципальные образования имеют весьма разную структуру хозяйства. Во многих случаях коммунальное потребление энергоресурсов отнесено на промышленность. Наблюдаются случаи, когда учет энергопотребления осуществляется по месту регистрации предприятия, в то время как производственные подразделения его находятся в других муниципальных образованиях (г. Стрежевой). С недостаточной достоверностью в сельских районах учитывается потребление прочих энергоресурсов, и в частности дров.

Сопоставление структуры потребления энергоресурсов в отраслевых комплексах в 1985 и 2000 годах показывает существенное снижение (на порядок) потребления энергоресурсов в строительстве, сельском хозяйстве (втрое), транспорте (вдвое) и жилищно-коммунальном хозяйстве (рис. 2.8). Увеличение потребления энергоресурсов населением до 22 % от суммарного свидетельствует о двух явлениях:

- во-первых, при снижении энергопотребления в других отраслевых комплексах доля потребления населением повышается;

- во-вторых, малый бизнес в значительно большей степени, чем ранее, использует электроэнергию и тепло для малых производственных нужд, тем более, что плата по категории «население» значительно ниже, чем по категории «промышленность».

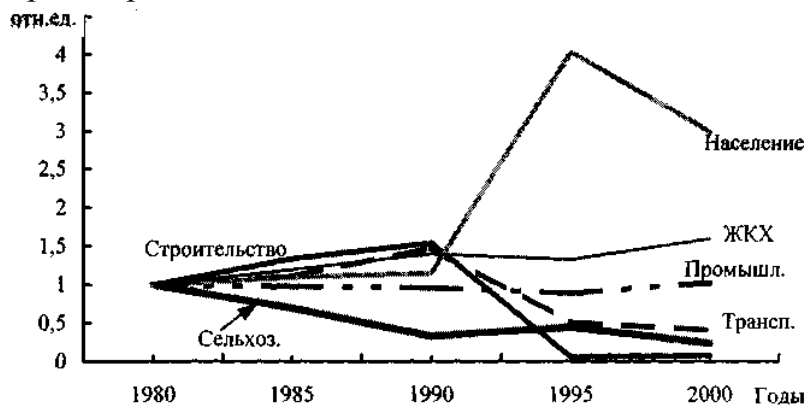


Рис. 2.8. Динамика потребления энергоресурсов в отраслевых комплексах области [4]

Более углубленный анализ потребления топливно-энергетических ресурсов целесообразно выполнить для *промышленности*, как наиболее энергоемкого отраслевого комплекса региона. Всего в 2000 году промышленностью потреблено около 4200 тыс. тонн условного топлива, или 56,8 % всего потребления области. Только электроэнергии промышленностью получено 3388 млн кВтч, что составляет более 60 % всей потребляемой областью электроэнергии (рис. 2.9).

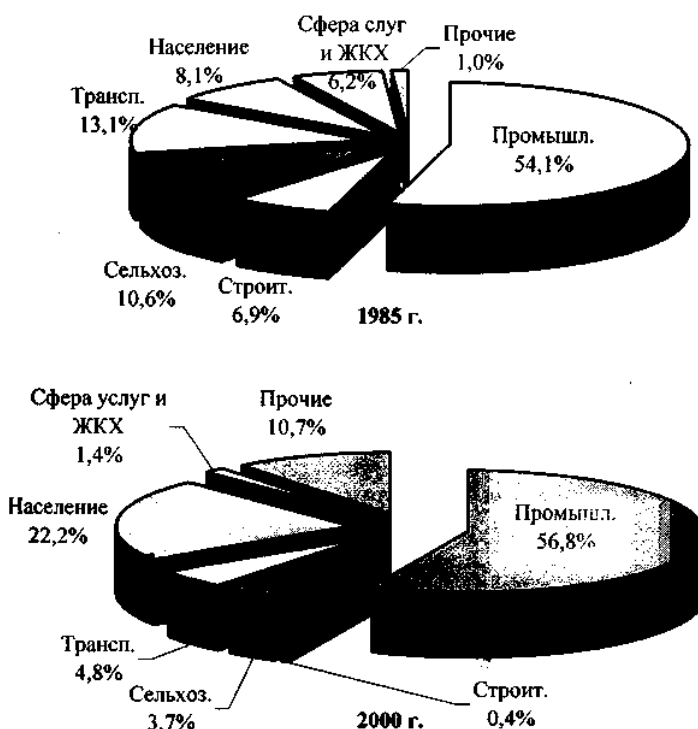


Рис. 2.9. Структура потребления энергоресурсов в отраслевых комплексах [4]

Промышленность области использует всю номенклатуру энергоресурсов (рис. 2.10).

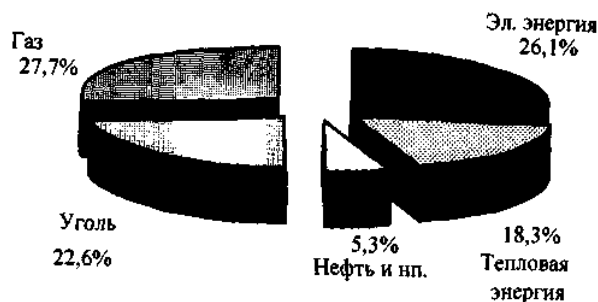


Рис. 2.10. Структура потребления энергоресурсов промышленностью Томской области в 2000 г. [4]

Энергопотребление тридцати наиболее крупных (с годовым потреблением более 6 тыс. т.у.т. в год) предприятий Томской области (табл. 2.10) составило более двух третей энергопотребления промышленности.

Последовательное углубление анализа энергопотребления в конечном счете должно позволить оценить эффективность использования энергетических ресурсов. Далее анализ может быть продолжен внутри предприятия вплоть до конечного энергоприемника.

В *строительном комплексе* Томской области (структура потребления энергоресурсов представлена на рис. 2.11) потребление энергетических ресурсов в 2000 году составило 29,8 тыс. тут (0,4 % потребления в регионе). По сравнению с 1985 годом энергопотребление уменьшилось в 15 раз. Сокращение строительной

деятельности, особенно на предприятиях стройиндустрии, создало в отрасли условия для эффективного технического перевооружения, позволяющего использовать наиболее эффективные технологии. Однако их реализация требует серьезных инвестиций, которых отрасль пока не имеет.

Таблица 2.7

Потребление энергоресурсов наиболее энергоемкими предприятиями Томской области [4]

| №<br>п/п | Предприятия                                           | Потребление                        |                                  |                                   |
|----------|-------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
|          |                                                       | Энерго-<br>ресурсы,<br>тыс. т.у.т. | Электро-<br>энергия,<br>млн кВтч | Тепловая<br>энергия.<br>тыс. Гкал |
| 1        | АО «Томскэнерго»                                      | 1897                               |                                  |                                   |
| 2        | ОАО «Томскнефть»                                      | 430                                | 814,1                            | 626,4                             |
| 3        | ОАО «Томсктрансгаз»                                   | 120                                | 168                              | 25,2                              |
| 4        | ОАО «Томский нефтехимический завод»                   | ПО                                 | 180                              | 410                               |
| 5        | ОАО «Магистральные нефтепроводы Центральной Сибири»   | 53                                 | 110                              | 30,2                              |
| 6        | МП «Томскводоканал»                                   | 52                                 | 155                              |                                   |
| 7        | ОАО «Ролтом»                                          | 32                                 | 43,2                             | 84,5                              |
| 8        | МПП «Стрежевойкоммунхоз»                              | 25,9                               | 67,1                             | 13,5                              |
| 9        | ОАО «Томский завод резиновой обуви»                   | 25,1                               | 20                               | 80                                |
| 10       | ОАО «Томский завод ДСП»                               | 20,5                               | 17,4                             | 56,2                              |
| 11       | ОАО «Томский завод строительных материалов и изделий» | 20                                 | 10                               | 36                                |
| 12       | ОАО «Томский лесопромышленный комбинат»               | 20                                 | 17,4                             | 56,2                              |
| 13       | ОАО «Томский завод стеновых материалов и изделий»     | 20                                 | 8,8                              | 36,2                              |
| 14       | ЗАО «Сибкабель»                                       | 19,8                               | 331,1                            | 57                                |
| 15       | ОАО «Томский инструмент»                              | 15,8                               | 27,7                             | 25,6                              |
| 16       | ОАО «завод ЖБК-100»                                   | 14,5                               | 8,4                              | 73                                |
| 17       | ОАО «Томский электроламповый завод»                   | 13                                 | 14,1                             | 15,8                              |
| 18       | ОАО «Томский приборный завод»                         | 11,8                               | 12,1                             | 49,5                              |
| 19       | ЗАО «Карьероуправление»                               | 10,4                               | 10,6                             | 6,4                               |
| 20       | ОАО «Сибэлектромотор»                                 | 10,4                               | 11,5                             | 39,1                              |
| 21       | МП «Трамвайно-троллейбусное управление»               | 10                                 | 24,2                             | 7,9                               |
| 22       | ОАО «Манотомь»                                        | 9,6                                | 9,5                              | 32                                |
| 23       | ОАО «Электроцентролит»                                | 9,4                                | 9,6                              | 23,1                              |
| 24       | ОАО «Томсктелеком»                                    | 9,3                                | 16,7                             | 23                                |
| 25       | ОАО «Томскгазстрой»                                   | 8,3                                | 2,6                              | 25,2                              |
| 26       | ЗАО «Горэлектросети»                                  | 8                                  | 161,5                            |                                   |

|    |                                         |     |      |      |
|----|-----------------------------------------|-----|------|------|
| 27 | ОАО «Томскмясо»                         | 6,5 | 6,6  | 25,6 |
| 28 | ОАО «Томский электромеханический завод» | 6,1 | 10,9 | 14,6 |
| 29 | ОАО «Томскхлебопродукт»                 | 5,2 | 4,3  | 18,8 |
| 30 | ГП «Томский электротехнический завод»   | 5,1 | 3,9  | 23,1 |

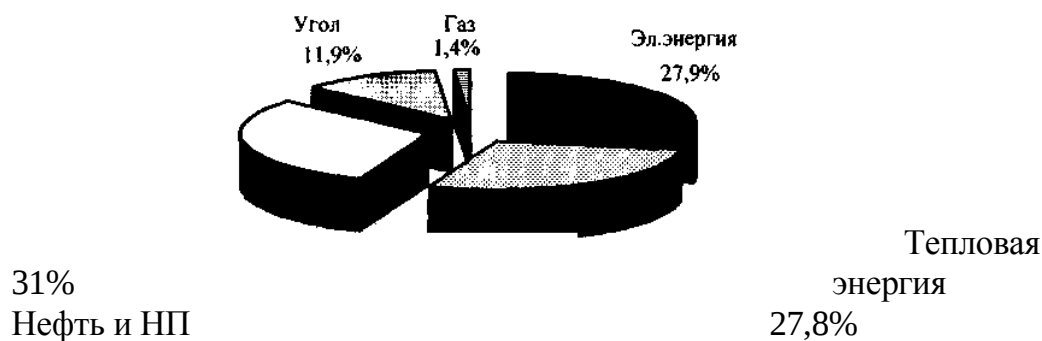


Рис. 2.11. Структура потребления энергоресурсов в строительном комплексе Томской области в 2000 г. [4]

Общий объем *сельскохозяйственного* производства в области по сравнению с аграрными регионами России и Сибири незначителен. Так, в 2000 году этот сектор экономики потреблял 275 тыс. т.у.т. энергетических ресурсов, что составляет 3,7 % общего потребления области.

Удельные расходы энергоресурсов по всему сельскохозяйственному комплексу определенно превышают показатели в среднем по России и другим странам. Климатические условия области для осуществления сельскохозяйственной деятельности и для жизнедеятельности человека малопригодны:

средняя годовая температура, °С .....- 1  
 средняя температура самых холодных суток, °С -50  
 средняя температура самых теплых суток, °С + 32  
 длительность отопительного сезона, сут.....250  
 число градусодней ..... 6100

Вместе с тем объем сельскохозяйственной продукции, учитываемый статистикой, в денежном отношении соответствует примерно 0,87% объема сельскохозяйственного производства России. При этом энергоресурсов (в частности, моторного топлива) на единицу произведенной продукции расходуется больше, чем в среднем по России.

Так, в 2000 году этот показатель составил 40,7 кг у.т/1000 руб.

Потенциал энергосбережения в сельскохозяйственном комплексе значителен. В первую очередь, это касается нефтепродуктов. Значительная часть котельных на селе сжигает сырую нефть, и эффективность этого процесса крайне низка, в первую очередь, из-за слабо подготовленного

персонала. Большие резервы есть и при использовании моторного топлива и электроэнергии.

**В транспортном комплексе** потребление энергоресурсов составило в 2000 году 500 тыс. т.у.т. (6,7%). Структура потребляемых энергоресурсов на транспорте представлена в табл. 2.7 и на рис. 2.12:

Таблица 2.7

Потребление энергоресурсов в транспортном комплексе Томской области [4]

| Энергоресурсы                 | Всего | %    |
|-------------------------------|-------|------|
| Уголь, тыс. т.                | 22,7  | 6,8  |
| Газ, тыс. м <sup>3</sup>      | 10    | 4,4  |
| Нефть и нефтепродукты, тыс. т | 85,4  | 45,6 |
| Электроэнергия, млн кВт-ч     | 207,8 | 25,3 |
| Тепловая энергия, тыс. Гкал   | 274,3 | 17,9 |

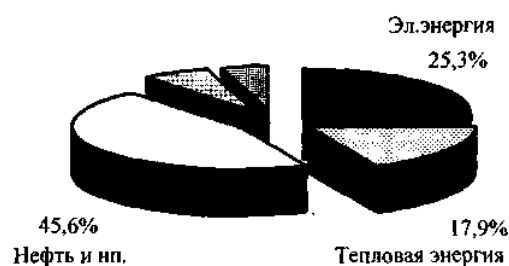


Рис. 2.12. Структура потребления энергоресурсов в транспортном комплексе Томской области в 2000 г. [4]

Объем транспортной работы в Томской области сравнительно невелик по отношению к другим регионам. Ее структура по видам транспорта представлена в табл. 2.8.

Таблица 2.8. Структура грузовых и пассажирских перевозок в Томской области [4]

| Вид транспорта  | Пассажирские перевозки, % | Грузовые перевозки, % |
|-----------------|---------------------------|-----------------------|
| Воздушный       | 0,2                       | 0,1                   |
| Железнодорожный | 1                         | 10,2                  |
| Речной          | 0,1                       | 14,4                  |
| Автомобильный   | 64,6                      | 21,1                  |
| Трамвай         | 9,6                       | -                     |
| Троллейбус      | 25,5                      | -                     |
| Трубопроводный  | -                         | 54,2                  |

Незначительность авиационных перевозок в настоящее время делает эффект энергосбережения в ней слабо ощутимым для Томской области в целом.

На железнодорожном транспорте улучшение использования энергетических ресурсов обеспечивает в основном электрификация тяги. Так, при тепловозной тяге на каждые десять тысяч тонно-километров грузовых перевозок расходуется 44 - 46 кг у.т., а при электрической - 32,5 кг у.т. (на 25 % меньше). Однако при малом пассажиро - и грузообороте по однокорейной дороге Томск - Асино - Белый Яр ее электрификация экономически нецелесообразна.

Речной транспорт в Томской области действует на протяженности 5,2 тыс. км водных путей, что составляет 5,5 % общей протяженности водных путей России. Удельный расход моторного топлива в этом секторе (включая перевалку грузов в портах) составил 9,7 кг у.т. на 1000 приведенных тонно-километров, что выше, чем в среднем по России.

Автомобильный транспорт обеспечивает 53% пассажирских и 46% грузовых колесных перевозок. Удельный расход моторного топлива на грузовом автотранспорте достиг 190 г.у.т. / т-км, что в 1,5 раза выше, чем в среднем по стране и примерно вдвое выше чем в США, Западной Европе, Японии. Причина лежит в качестве дорог, структуре парка автомобилей (высока доля карбюраторных), низкой среднегодовой температуре. Только за счет повышения качества дорожного покрытия и повышения доли дизельных автомобилей можно снизить расход топлива на 25 - 30%. Обеспеченность автобусами и легковыми автомобилями в области почти в два раза выше, чем в среднем по стране, однако удельные расходы топлива существенно (на 30-40%) выше.

Городской электрический транспорт - трамвай и троллейбус - по количеству перевозимых пассажиров почти вдвое уступает автомобильному. Расчеты по замене автобусного сообщения на троллейбусное на ряде городских маршрутов показали, что только при больших объемах перевозок проявляется энергосберегающий эффект. Экономическая целесообразность такой замены может иметь место при значительном повышении цены перевозок или значительном усилении экологических требований к автомобилям по газовым выбросам.

Трубопроводный транспорт является абсолютным лидером по объемам транспортной работы в Томской области - 55 % объема доставки грузов осуществляется по трубопроводам. Дальнейшее развитие системы трубопроводов углеводородного сырья в еще большей степени увеличит объемы транспортировок в связи с освоением новых месторождений нефти и газа. Удельный расход электроэнергии составляет:

- 80 кВт-ч /1000 м<sup>3</sup>-км - по газопроводу;
- 15 кВт-ч /1000 т-км - по нефтепроводу.

В целом по транспортному комплексу области объемы энергопотребления, его структура не позволяют делать оптимистические прогнозы по величине потенциала энергосбережения.

Населением Томской области в 2000 году потреблено 1652 тыс. т.у.т. энергоресурсов, что составляет 22,2%. Структура потребляемых населением Томской области энергоресурсов представлена на рис. 2.13, а ее динамика - на рис. 2.14.

Значительный рост энергопотребления населением в период 1994 - 1996 гг. требует углубленного анализа.

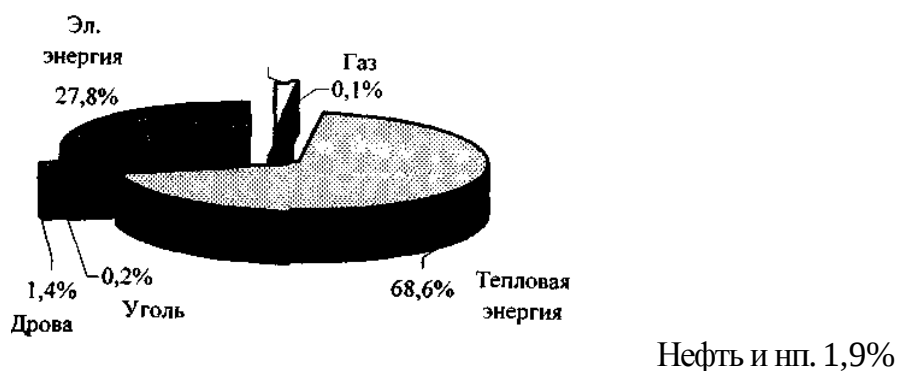


Рис. 2.13. Структура энергоресурсов, потребляемых населением 8 2000 г. [4]

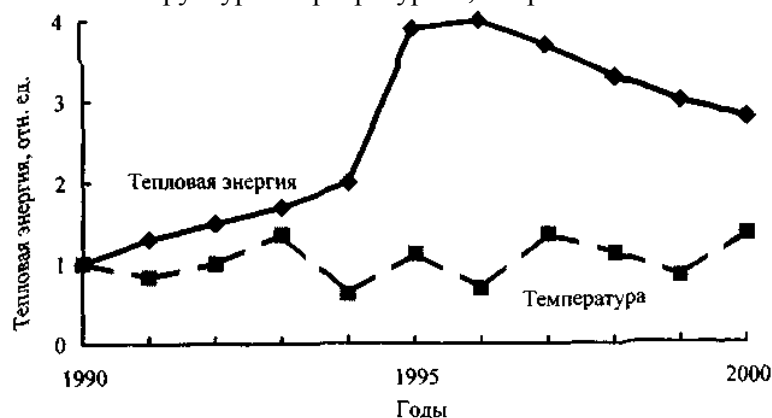


Рис- 2.14. Динамика потребления тепловой энергии и график средних температур отопительного сезона Томской области за период 1999 - 2000 гг. [4]

Сопоставление объемов потребления тепловой энергии с климатическими (температурными) условиями этого периода показывает немотивированность значительного увеличения объемов отопительные расх.одей энергии.

Данные по душевому потреблению энергоресурсов в динамике приведены в табл. 2.9, в соответствии с другими регионами и странами - в табл. 2.10, по отраслям - на рис. 2.15.

Таблица 2.9 Потребление энергетических ресурсов на душу населения в Томской области [4]

| Показатели                  | Годы  |       |       |        |       |
|-----------------------------|-------|-------|-------|--------|-------|
|                             | 1980  | 1985_ | 1990  | 1995   | 2000  |
| Население, тыс. чел.        | 903,1 | 965,7 | 1009  | 1079,6 | 1004  |
| Энергоресурсы, кг у.т./чел. | 6528  | 6528  | 7290  | 6811   | 7410  |
| Электроэнергия, кВтч/чел.   | 3481  | 5062  | 6047  | 5798   | 5442  |
| Тепловая энергия, Гкал/чел. | 7630  | 12300 | 16610 | 7300   | 13183 |
| Газ, м <sup>3</sup> /чел.   | 53    | 1460  | 1694  | 1410   | 1920  |
| Нефтепродукты, кг/чел.      | 37    | 124   | 66,4  | 464,2  | 602   |

Таблица 2.10  
Структура душевого потребления, % [4]

| Секторы экономики | Сибирь | Томская область | Россия | США | Япония |
|-------------------|--------|-----------------|--------|-----|--------|
| КБ                | 19     | 12,41           | 22     | 32  | 23     |
| АПК               | 5      | 8,57            | 11     | 3   | 3      |
| ПК                | 39     | 52,99           | 40     | 32  | 48     |
| ТС                | 23     | 6,64            | 18     | 24  | 16     |
| ТЭК               | 14     | 19,39           | 9      | 9   | 8      |

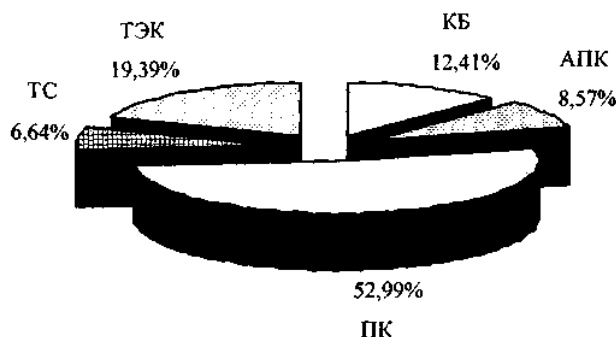


Рис. 2.15. Структура потребления энергоресурсов на душу населения в Томской области [4]

По электроэнергии это отличие еще более существенно (табл. 2.11) [4].

Таблица 2.11 Потребление электроэнергии на душу населения, % [4]

| Секторы | Сибирь | Томская область | Россия | США | Япония |
|---------|--------|-----------------|--------|-----|--------|
| КБ      | 10     | 18,1            | 16     | 59  | 42     |
| АПК     | 6      | 18,3            | 9      | 3   | 4      |
| ПК      | 44     | 49,9            | 36     | 25  | 40     |
| ТС      | 7      | 5,9             | 6      | 1   | 2      |
| ТЭК     | 32     | 7,8             | 32     | 11  | 10     |

Для обеспечения высокого качества составления и анализа топливно-

энергетического баланса региона, оптимизации последовательности формирования и углубления его содержания целесообразно выстроить следующую схему и последовательность действий:

- Формирование баланса:
  - сбор и верификация материалов по потреблению энергетических ресурсов во всех элементах хозяйственного комплекса и по всем используемым энергоресурсам;
  - составление частных балансов по видам используемого топлива и энергии;
  - формирование сводного баланса и выявление статистических небалансов.
- Анализ топливно-энергетического баланса:
  - изучение причин небалансов и попытка их устранения;
  - изучение соотношения и динамики добываемых, производимых и используемых в регионе энергоресурсов;
  - изучение энергетических соотношений процессов преобразования энергии и топлива;
  - изучение потребления энергоресурсов в муниципальных образованиях, отраслевых комплексах, предприятиях и организациях.
- Выявление потенциала энергосбережения:
  - формирование эталонных и идеальных моделей энергетических процессов и оценка суммарных потерь;
  - сравнение реальных потерь с потерями в эталонных и идеальных моделях;
  - оценка потенциала энергосбережения.

Анализ энергетического баланса региона показывает объемы, структуру и динамику потоков энергетических ресурсов. Но для разработки объективных мер энергосбережения важно знать не только объекты, где имеют место значительные потери энергоресурсов, но и способы их снижения и цену, которую за это нужно заплатить [41].

#### 2.4.3 Оценка потенциала энергосбережения

Энергетическое обследование предприятия предполагает оценить потенциал энергосбережения. Такая оценка возможна при доведении анализа энергопотребления до стадии определения полезных конечных расходов энергии:

- в осветительных системах полезно используемая энергия определяется по величине освещенности на рабочей поверхности;
- в транспортных системах - по величине произведенной транспортной работы;
- в силовых процессах - по количеству механической энергии конечного исполнительного механизма;
- в термических процессах - по теоретическому расходу энергии на нагрев, плавку, испарение и проведение эндотермических реакций;

- в отоплении, вентиляции, горячем водоснабжении - по количеству реально полезного потребителю тепла;

- в электрохимических процессах - по расходу энергии, теоретически необходимой для массопереноса;

- в процессах хранения, переработки, преобразования и транспорта топлива и энергии - по количеству энергоносителя, получаемого после соответствующего преобразования.

Энергия, запасенная в топливе (энергетический потенциал топлива), может быть извлечена при сжигании или при иных физико-химических преобразованиях. Выделяемую при этом *полезную* энергию сопровождают **потери**. Величина потерь определяется степе

пенью совершенства технологического процесса. Полезный расход энергии любого процесса, установки, объекта выражается через коэффициент полезного использования энергии:

$$W_{\text{пол}} = \eta \cdot W_{\text{зат}}$$

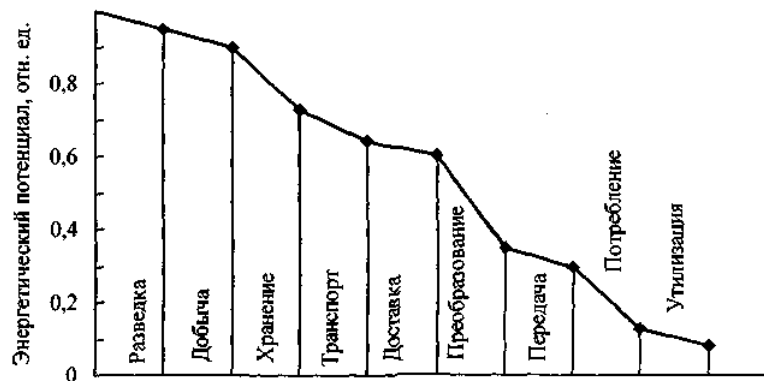
где  $W_{\text{зат}}$  - энергия внешнего источника, подведенная к объекту;  $\eta$  - КПИ энергии в рассматриваемом процессе.

Представление об энергетическом потенциале сформулировано в работах [13,14]. Оно основывается на сопоставлении коэффициентов полезного использования энергии действующего и перспективного технологических процессов, значения которых приведены в табл. 2.12.

Таблица 2.12. Оценка технико-экономических значений КПИ энергии ТЭР для предприятий промышленности, отн. ед. [4]

| Виды процессов                          | Значения КПИ               |                      |             |           |                            |                      |             |           | Доля существующего к перспективному |
|-----------------------------------------|----------------------------|----------------------|-------------|-----------|----------------------------|----------------------|-------------|-----------|-------------------------------------|
|                                         | Существующие               |                      |             |           | Перспективные              |                      |             |           |                                     |
|                                         | Генерация и преобразование | Транспорт и передача | Потребление | Суммарная | Генерация и преобразование | Транспорт и передача | Потребление | Суммарная |                                     |
| Двигатели внутреннего сгорания          | 0,87                       | 0,93                 | 0,20        | 0,16      | 0,90                       | 0,95                 | 0,25        | 0,21      | 0,72                                |
| Электропривод                           | 0,29                       | 0,85                 | 0,65        | 0,15      | 0,40                       | 0,90                 | 0,85        | 0,30      | 0,5                                 |
| Освещение                               | 0,29                       | 0,85                 | 0,20        | 0,5       | 0,29                       | 0,85                 | 0,40        | 0,10      | 0,5                                 |
| Централизованное теплоснабжение         | 0,78                       | 0,92                 | 0,85        | 0,60*     | 0,85                       | 0,96                 | 0,95        | 0,77      | 0,78                                |
| Децентрализованное теплоснабжение       | 0,55                       | 0,93                 | 0,90        | 0,46      | 0,75                       | 0,97                 | 0,95        | 0,69      | 0,68                                |
| Высокотемпературные топливные установки | 0,87                       | 0,90                 | 0,35        | 0,27      | 0,90                       | 0,92                 | 0,65        | 0,54      | 0,5                                 |

Если распространить такой подход на весь жизненный цикл топлива и энергии, то изменение энергетического потенциала можно представить так, как это показано на рис. 2.16.



Этапы жизненного цикла

Рис. 2.16. Изменение энергетического потенциала топлива и энергии на этапах жизненного цикла энергоресурса [4]

Очевидно, потери энергии, потери энергетического потенциала имеют место на каждом этапе жизненного цикла. Но при этом целесообразно выделить различные их категории:

- потери, связанные с осуществлением данного технологического процесса и зависящие от технического совершенства оборудования;
- потери в действующем процессе по сравнению с процессом, осуществляемым на более высоком научно-техническом уровне, известном в мировой и отечественной практике;
- потери, экономически оправданные при осуществлении технологического процесса на традиционном уровне и при действующем оборудовании;
- потери, экономически оправданные при осуществлении технологического процесса на передовом научно-техническом уровне;
- потери, связанные с разрегулированностью технологической схемы, с эксплуатацией оборудования в неоптимальных режимах;
- потери, связанные с использованием энергоресурсов пониженного качества;
- потери, вызванные необходимостью поддерживать повышенный уровень надежности, безопасности, живучести и т.п.;
- потери, связанные с обеспечением повышенного комфорта, специфических условий труда, информационными и социально-политическими мероприятиями.

Таким образом, все потери энергии и энергоресурсов уверенно делятся на три группы:

- а) потери, вызванные износом оборудования, отклонениями ре

жима его работы от проектного, нормативного регламента. Снижение или устранение этих потерь осуществляется организационными, регламентными, ремонтными мероприятиями;

б) потери, вызванные устарелыми технологическими процессами, а их снижение требует технологического совершенствования или коренной реконструкции, замены технологии;

в) потери, вызванные теоретическим несовершенством технологии.

*Потенциал энергосбережения* показывает, какую долю потерь энергии (энергоресурса) можно сократить или полезно использовать, если произвести соответствующие переустройства технологических процессов. Он характеризуется соотношением коэффициентов полезного использования энергии действующего (реального) и преобразованного (перспективного) технологического процесса. В качестве последнего могут быть использованы нормативный, эталонный и идеальный процессы.

Нормативный технологический процесс - это процесс, в котором оборудование и его режимы соответствуют нормативным, паспортным, проектным данным.

Эталонным процессом следует считать такой, в котором используются технологии, соответствующие лучшим научно-техническим достижениям, реализованным в России или в мире.

Идеальным технологическим процессом является такой процесс, в котором используется теоретически возможная, но практически недостижимая технология.

Сопоставление потерь энергии в реальном и перспективном процессе дает оценку потенциала энергосбережения. Ее осуществление на практике представляет собой последовательное выполнение следующих действий:

1. На основе результатов энергетического обследования *реального* процесса или отчетных материалов, на этапах технологического процесса определяются значения *потерь* энергии (энергоресурсов).

2. Вычисляются нормативные потери технологического процесса. Наглядное сопоставление реальных и нормативных потерь представлено в табл. 4-17.

3. Нормативный потенциал энергосбережения на каждом этапе вычисляется поэлементным вычитанием соответствующих значений потерь. Он показывает долю потерь, которые могут быть сокращены, если отрегулировать технологию до уровня проектной, нормативной:

$$\Pi = \Delta W_p - \Delta W_n$$

где  $\Pi$  - потенциал;  $\Delta W_p$  - потери в реальном процессе,  $\Delta W_n$  - потери в нормативном процессе.

Т а б л и ц а 2.13 Матрица потерь реального и эталонного баланса, % [4]

| Этапы<br>жизненного<br>цикла                     | Энергоресурсы |                               |           |           |                        |                        |
|--------------------------------------------------|---------------|-------------------------------|-----------|-----------|------------------------|------------------------|
|                                                  | Уголь         | Нефть и<br>нефте-<br>продукты | Газ       | Прочие    | Электро-<br>энергия    | Тепловая<br>энергия    |
| Добыча                                           | -             | 0,02/0,02                     | 0,04/0,03 | 0,08/0,06 |                        |                        |
| Хранение                                         | 0,05/0,04     | 0,02/-                        | 0,02/-    | 0,04/0,03 |                        |                        |
| Транспорт                                        | 0,07/0,05     | 0,2/0,18                      | 0,05/0,04 | 0,04/0,03 |                        |                        |
| Преобразование<br>(котельные)                    | 0,1/0,08      | 0,06/0,04                     | 0,08/0,07 | 0,12/0,08 |                        |                        |
| Производство,<br>комбинированное<br>производство |               |                               |           |           | 0,48/0,44<br>0,24/0,22 | 0,30/0,28<br>0,24/0,21 |
| Передача                                         |               |                               |           |           | 0,10/0,08              | 0,40/0,35              |
| Потребление                                      |               |                               |           |           | 0,30/0,28              | 0,20/0,18              |
| Утилизация                                       | 0,03/0,02     |                               | 0,02/0,01 | 0,02/0,01 |                        |                        |

П р и м е ч а н и е . В числителе показаны реальные, а в знаменателе нормативные потери.

4. Переводя элементы потерь в однородные именованные единицы и суммируя их по столбцам, получают величину потенциала по виду энергоносителей, а по строкам - потенциал по этапам жизненного цикла.

5. Аналогично могут быть определены элементы потерь и значения потенциала энергосбережения по отношению к эталонному и идеальному технологическим процессам. Сопоставление реального, нормативного, эталонного и идеального процессов наглядно может быть осуществлено в следующей четырехмерной системе: по осям системы координат откладываются в одинаковом масштабе величины суммарных потерь соответствующих процессов. Искажение симметрии этой фигуры показывает степень отличия этих процессов: реального, нормативного, эталонного и идеального (рис. 2.17).

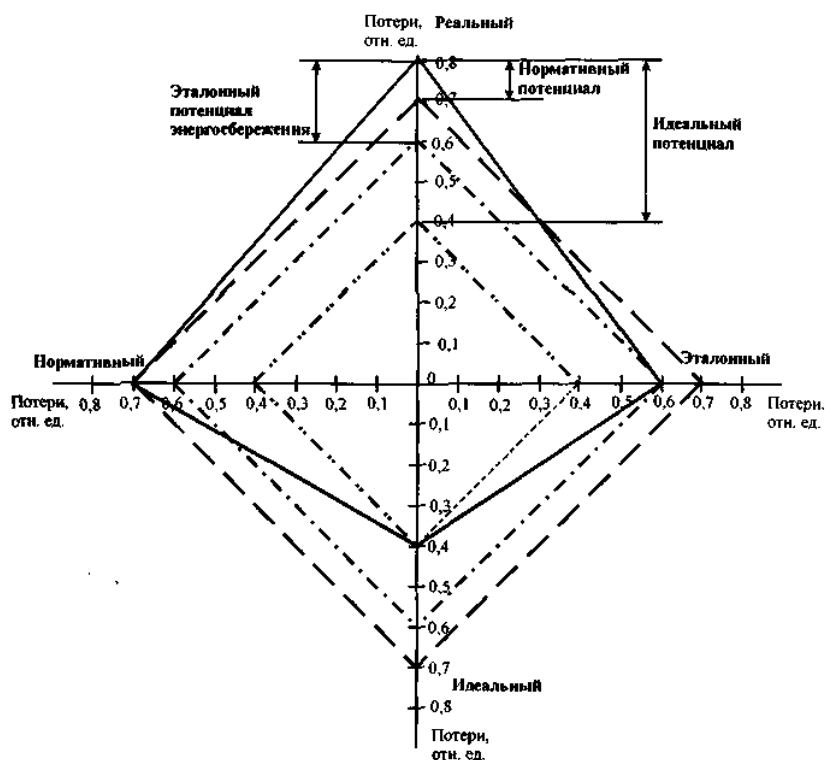


Рис. 2.17. Представление потерь энергии в реальном, нормативном, эталонном и идеальном технологических процессах [4]

Такой подход поэлементного сопоставления потерь на первый взгляд вполне оправдан, однако иногда возникают вопросы, связанные с неоднородностью технологических процессов, например, реального и эталонного. Тогда поэлементное сравнение невозможно и необходимо рассматривать процессы в целом. Результаты оценк потенциала энергосбережения условного технологического процесса по нормативному, эталонному и идеальному аналогам приведены в табл. 2.14.

Таблица 2.14 Потенциал энергосбережения по видам энергоресурсов, отн. ед. [4]

| Энергоресурсы                                   | По отношению |           |          |
|-------------------------------------------------|--------------|-----------|----------|
|                                                 | к норме      | к эталону | к идеалу |
| Уголь                                           | 0,04         | 0,06      | 0,12     |
| Газ                                             | 0,03         | 0,06      | 0,08     |
| Нефть и нефтепродукты                           | 0,05         | 0,06      | 0,09     |
| Прочие                                          | 0,06         | 0,09      | 0,13     |
| Э деетрознергия                                 | 0,20         | 0,30      | 0,35     |
| Электроэнергия (в комбинированном производстве) | 0,15         | 0,21      | 0,25     |
| Тепловая энергия                                | 0,22         | 0,37      | 0,45     |

Тепловая энергия (в 0,26 0,40 0,48  
комбинированном производстве)

Укрупненная оценка потенциала энергосбережения была бы более полезна, если бы указывала на способы, какими потенциал возможно реализовать.

Анализ технологического потенциала энергосбережения и выработка мер по его извлечению позволяет выделить следующие группы энергосберегающих мероприятий.

*Организационные* мероприятия, которые сводятся к наведению регламентного порядка в использовании топлива и энергии. Среди них: устранение прямых потерь энергоносителей при транспорте и хранении, своевременный ремонт и наладка оборудования и изоляции, соблюдение энергоэкономичных технологических режимов, улучшение организации производства. Сокращение времени работы оборудования в холостых режимах, замена электродвигателей избыточной мощности, оборудование потребителей счетчиками электроэнергии, газа, воды и тепла, организация контроля за использованием энергии.

*Технологические* мероприятия обеспечивают модернизацию технологии и требуют определенных затрат для осуществления. Повышение эффективности использования энергии здесь является основной целью, а эффект от энергосбережения должен в приемлемые сроки окупить затраты на реализацию мероприятия.

*Инвестиционные* мероприятия выполняются в порядке технического перевооружения предприятия. Энергосбережение в этом случае часто является сопутствующим фактором.

Теперь потенциал энергосбережения может быть представлен в виде, показанном в табл. 2.15, 2.16.

Таблица 2.15 Потенциал энергосбережения, отн. ед. [4]

| Энергоресурсы    | Способ извлечения потенциала |                 |                |
|------------------|------------------------------|-----------------|----------------|
|                  | Организационный              | Технологический | Инвестиционный |
| Уголь            | 0,03                         | 0,05            | 0,09           |
| Газ              | 0,02                         | 0,04            | 0,06           |
| Нефть            | 0,02                         | 0,03            | 0,05           |
| Нефтепродукты    | 0,04                         | 0,05            | 0,08           |
| Прочие           | 0,06                         | 0,07            | 0,10           |
| Электроэнергия   | 0,10                         | 0,12            | 0,18           |
| Тепловая энергия | 0,15                         | 0,20            | 0,28           |

Т а б л и ц а 2.16 Потенциал энергосбережения в регионе [4]

| Отраслевые комплексы региона    | Потенциал, тыс. т.у.т. |                      |                     |
|---------------------------------|------------------------|----------------------|---------------------|
|                                 | Организа-<br>ционный   | Технологи-<br>ческий | Инвестици-<br>онный |
| Промышленность                  | 10                     | 30                   | 600                 |
| Строительство                   | 0,5                    | 1,5                  | 4                   |
| Сельское хозяйство              | 5                      | 10                   | 40                  |
| Транспорт                       | 10                     | 25                   | 55                  |
| Население                       | 60                     | 200                  | 400                 |
| Коммунально-бытовое хозяйство   | 2                      | 8                    | 20                  |
| Топливо-энергетический комплекс | 20                     | 40                   | 160                 |

Знание величины извлекаемого потенциала энергосбережения позволяет не только уверенно планировать разработку и реализацию программы энергосбережения, но и обеспечивать ее исполнение путем сосредоточения сил и средств на основных направлениях.

**Пример 1.** Оценить суммарные потери энергии и потенциал энергосбережения в осветительной системе, состоящей из следующих элементов: светового прибора, светильника, осветительной сети, архитектуры освещения.

Если полезной считать энергию светового потока на рабочей поверхности при заданной ее освещенности, то возможно рассчитать потери, которые имеют место в элементах этой цепочки, и сравнить их между собой для разных технологических схем (табл. 2.17).

Т а б л и ц а 2.17 Потери в элементах цепи подачи энергии освещения, отн. ед. [4]

| Схема       | Потери<br>световых<br>приборах | Потери<br>в светильни-<br>ках | Потери пускорегули-<br>рующей аппаратуры<br>и питающей сети | Суммарные<br>потери |
|-------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------|
| Обследуемая | 0,50                           | 0,20                          | 0,10                                                        | 0,80                |
| Нормативная | 0,45                           | 0,18                          | 0,07                                                        | 0,70                |
| Эталонная   | 0,40                           | 0,10                          | 0,05                                                        | 0,60                |
| Идеальная   | 0,32                           | 0,05                          | 0,03                                                        | 0,40                |

Потенциал энергосбережения для рассматриваемой системы представлен в табл. 2.18.

Т а б л и ц а 2.18 Потенциал энергосбережения, отн. ед. [4]

| Потенциал   | Организационный | Технологический | Инвестиционный |
|-------------|-----------------|-----------------|----------------|
| Нормативный | 0,01            | 0,02            | 0,07           |
| Эталонный   | 0,03            | 0,05            | 0,12           |
| Идеальный   | 0,05            | 0,08            | 0,27           |

**Пример 2.** Определить суммарные потери энергии и потенциал энергосбережения в системе приточной вентиляции. Результаты приведены в табл. 2.19, 2.20.

Таблица 2.19 Потери в элементах системы, отн. ед. [4]

| Система     | Потери в двигателе | Потери в воздухо-проводах | Потери пускоре-гулирующей аппаратуры | Потери в сети | Суммарные потери |
|-------------|--------------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------|------------------|
| Обследуемая | 0,10               | 0,20                      | 0,05                                 | 0,05          | 0,40             |
| Нормативная | 0,08               | 0,17                      | 0,04                                 | 0,03          | 0,32             |
| Эталонная   | 0,05               | 0,10                      | 0,03                                 | 0,03          | 0,21             |
| Идеальная   | 0,03               | 0,05                      | 0,02                                 | 0,02          | 0,12             |

Таблица 2.20 Потенциал энергосбережения, отн. ед. [4]

| Потенциал   | Организационный | Технологический | Инвестиционный |
|-------------|-----------------|-----------------|----------------|
| Нормативный | 0,01 0,03 0,05  | 0,02 0,05 0,08  | 0,07 0,12 0,27 |
| Эталонный   |                 |                 |                |
| Идеальный   |                 |                 |                |

### Выводы

1. Для определения экономически оправданных пропорций топливно-энергетического хозяйства региона, подготовки управляющих решений по обеспечению потребностей экономики и населения в энергоресурсах, создания и реализации региональной системы энергосбережения и анализа ее эффективности необходимо формировать и анализировать топливно-энергетические балансы региона и муниципальных образований.

2. Анализ топливно-энергетического баланса, состоящий в изучении соотношений и динамики потребления энергоресурсов и сопоставлении удельных расходов в рассматриваемом объекте с аналога-

МИ, обеспечивает выявление статистических небалансов отчетности в использовании энергоресурсов и причин их появления и формулирование направлений устранения небалансов.

3. Сравнение реального процесса энергоиспользования с эталонным и идеальным процессами позволило создать концепцию и разработать метод определения потенциала энергосбережения, пригодный для использования на предприятиях, отраслевых комплексах региона и в регионе в целом. Оценку

технологического потенциала энергосбережения целесообразно осуществлять диверсифицированно относительно организационных, технологических и инвестиционных энергосберегающих мер.

## 2.5. Энергетический паспорт предприятия

Энергетический паспорт промышленного потребителя топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) – это нормативный документ, отражающий баланс потребления и содержащий показатели эффективности использования ТЭР в процессе хозяйственной деятельности объектами производственного назначения, а также содержащий энергосберегающие мероприятия.

Энергетический паспорт потребителя ТЭР разрабатывают в соответствии с ГОСТ 51379-99 «Энергетический паспорт промышленного потребителя топливно-энергетических ресурсов. Основные положения. Типовые формы» на основе энергетического обследования, проводимого с целью оценки эффективности использования ТЭР, разработки и реализации энергосберегающих мероприятий.

### 2.5.1. Разделы энергетического паспорта

Энергетический паспорт состоит из следующих разделов:

1. Общие сведения о потребителе ТЭР (наименование, реквизиты предприятия, объем производства основной и вспомогательной продукции, численность персонала и др.);

2. Сведения о потреблении ТЭР:

- общее потребление энергоносителей (годовое потребление и коммерческий учет потребления всех видов энергоносителей на предприятии);

- потребление электроэнергии (информация о трансформаторных подстанциях, мощности электроприемников, собственном производстве электрической и тепловой энергии, годовом балансе потребления электроэнергии);

- потребление тепловой энергии (информация о составе и работе котельных агрегатов, сведения о технологическом оборудовании, использующем тепловую энергию, расчетно-нормативном потреблении тепловой энергии, а также годовой баланс потребления тепловой энергии);

- потребление котельно-печного топлива (характеристики топливоиспользующих агрегатов, баланс потребления котельно-печного топлива);

- потребление моторного топлива (информация об использовании моторных топлив транспортными средствами, баланс потребления моторного топлива);

- Сведения об эффективности использования ТЭР (об удельных расходах ТЭР);

- Мероприятия по энергосбережению и повышению эффективности использования ТЭР;

#### 4 Выводы.

Заключительный раздел энергетического паспорта потребителя ТЭР должен включать:

- перечень зафиксированных при обследовании потребителя фактов непроизводительных расходов ТЭР с указанием их величины в стоимостном и натуральном выражении;
- предлагаемые направления повышения эффективности использования ТЭР с оценкой экономии последних в стоимостном и натуральном выражении с указанием затрат, сроков внедрения и окупаемости;
- количественную оценку снижения уровня непроизводительных расходов ТЭР за счет внедрения энергосберегающих мероприятий.

Основные характеристики энергетического хозяйства предприятия отражаются в структуре паспорта (рис. 2.19).



Рис. 2.19. Структура энергетического паспорта предприятия

## 2.6. Энергоаудит

Энергетический аудит (энергоаудит) - это техническое инспектирование энергогенерирования и энергопотребления предприятия с целью определения возможностей экономии энергии и оказания помощи предприятию в осуществлении мероприятий, обеспечивающих экономию энергоресурсов на практике.

Согласно Минэнерго РФ энергоаудитор - юридическое лицо (организация, кроме надзорных органов), осуществляющее энергетическое обследование потребителей ТЭР и имеющее лицензию на производство этих работ.

В ходе проведения энергоаудита получают объективные оценки об энергетических событиях на предприятии, устанавливают уровень их соответствия показателям энергетической эффективности в соответствии с ГОСТ Р 51541- 99 «Энергетическая эффективность. Состав показателей». Результаты энергоаудита в виде рекомендаций энергоаудитор представляет в Минэнерго РФ или иным заинтересованным организациям.

## 2.7. Международное сотрудничество в области энергосбережения

В 2003 г. по инициативе Международной топливно-энергетической ассоциации (МТЭА) состоялся IV Московский Международный форум «Энергетика и общество».

МТЭА как союз ученых и предпринимателей была создана в 1989 г. Главная задача МТЭА - развитие международных связей с целью концентрации научно-технического потенциала ученых и научных организаций различных стран на решении актуальных проблем в области производства и рационального использования топливно-энергетических ресурсов. Сегодня МТЭА - международная общественная некоммерческая организация, учредителями которой являются крупные производители и поставщики нефти, газа, угля и электроэнергии, а девизом «За техническую политику создания эффективной и устойчивой энергетики».

Лидеры 117 государств, в том числе России, на Конференции ООН по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, 1992 г.) приняли национальные стратегии устойчивого развития общества.

Устойчивое развитие означает гармоничное развитие системы «энергетика - экономика - природа - человек».

Устойчивое развитие общества предполагает устойчивое развитие энергетики, поскольку именно с ее помощью природные ресурсы превращаются в продукты человеческой цивилизации.

МТЭА разработала программу «Российскую энергетику - на путь устойчивого развития совместными усилиями власти и общества».

Устойчивое развитие энергетики обеспечивается системой управления топливно-энергетическим сектором, которая охватывает все стадии от разведки, добычи энергоресурсов до их использования, и при которой

соблюдается баланс требований развития экономики, экологии, роста качества жизни людей и ресурсо-энергосбережение.

## ЛЕКЦИЯ 3. Основные понятия и законы энергосбережения

### 3.1. Введение

Основными видами энергетических ресурсов в современных условиях являются горючие ископаемые: газообразные (природный газ), жидкие (нефть, газовый конденсат), твердые (угли каменный и бурый, сланцы, торф, дрова), атомная энергия, гидроэнергия и энергия ветра. В табл. 3.1 приведены усредненные значения теплотворной способности некоторых видов ископаемых топлив.

Таблица 3.1 Теплотворная способность различных видов топлива

| Наименование топлива | Теплотворная способность, ккал/кг |
|----------------------|-----------------------------------|
| Газ природный        | 13 000                            |
| Газовый конденсат    | 11 000                            |
| Нефть                | 10 000                            |
| Уголь:               |                                   |
| каменный             | 7 500                             |
| бурый                | 7 000                             |
| Сланцы               | 3 500                             |

#### ***Условное топливо, нефтяной эквивалент***

Часто для сравнения различных видов топлива пользуются такими понятиями как, ***условное топливо, нефтяной эквивалент*** и некоторые другие, которые позволяют сравнивать топлива, различающиеся по теплотворной способности. Условное топливо - это топливо с теплотворной способностью 7000 ккал/кг. **Основная идея курса - рассмотреть ресурсосбережение углеводородного сырья через его энергосбережение.**

С тех пор как человек научился пользоваться огнем, ему понадобилось топливо. Главное назначение топлива получение тепла и света, т.е. энергии. В процессе эволюции и развития требования к ассортименту топлива росли. Первоначальными видами топлива были дрова, а также жир рыб и животных. Эти виды топлива были основными и широко применялись не только в быту, но и в промышленности и на транспорте. Сейчас сегмент топливных ресурсов, приходящихся на эти виды, резко сузился.

### 3.2. Виды топливно-энергетических ресурсов

#### ***Классификация топливно-энергетических ресурсов***

Современные виды топливо - энергетических ресурсов подразделяют по:

##### ***Агрегатное состояние***

- ♦ Газообразные топлива - природный газ (бытовой, сжатый, сжиженный), сжиженная пропан-бутановая смесь, водород;
- ♦ Жидкие - автомобильные и авиационные бензины, авиационный и осветительный керосины, дизельные топлива (летние и зимние), печные и котельные топлива;
- ♦ Твердые - уголь (каменный, бурый), сланцы, торф, древесина и другое растительное сырье.

### *Состав*

- ♦ Органические топлива;
- ♦ Неорганические топлива.

### *Происхождение*

- ♦ Естественные (ископаемые, природные) - газ, нефть, уголь;
- ♦ Искусственные - кокс (коксованием углей), искусственное жидкое топливо (ожижением или гидрогенизацией углей), биогаз - продукт газификации органических бытовых отходов;
- ♦ Синтетические - полученные в результате химических реакций Фишера -Тропша или Кельбеля-Энгельгарда синтетические углеводороды (газообразные, жидкие, твердые), различные неуглеводородные топлива - ракетные топлива (несимметричный диметилгидразин), ядерные топлива (плутоний).

### *Возобновление*

- ♦ Возобновляемое топливо - гидроэнергия, геотермальная энергия, ветровая и солнечная энергия, древесина и другое растительное сырье;
- ♦ Невозобновляемое топливо это синоним ископаемого топлива.

### *Назначение*

- ♦ Энергетическое топливо - используют для получения тепловой и электрической энергии; т.е. первоначально из топлива получают энергию в виде тепла, перегретого водяного пара, электроэнергии, энергетического топлива. Пример: газ или мазут на ТЭС;
- ♦ Технологическое топливо (как сырье) - используется непосредственно в производстве и технологических процессах, установках, реакторах, агрегатах без стадии предварительно получения из топлива необходимой энергии. Пример технологического топлива: уголь в процессе коксования для получения кокса.

### *Отношению к топливу*

- ♦ Топливные энергоресурсы (газ, нефть, газовый конденсат, уголь и др.);
- ♦ Не топливные энергоресурсы (гидроэнергия, энергия ветра, солнечная энергия).

Атомную энергию относят одновременно к топливному и не топливному энергетическому ресурсу.

### *Степень вовлечения в технологию*

- ♦ Первичные энергетические ресурсы - однократное использование энергетического потенциала конкретного вида энергии или топлива;
- ♦ Вторичные энергетические ресурсы (ВЭР) - многократное использование энергетического потенциала конкретного вида энергии или топлива (тепло дымовых газов, сырьевых и продуктовых технологических потоков).

*По виду энергии* вторичные энергетические ресурсы (ВЭР) разделяют на:

- Топливные ВЭР - побочные горючие газы, жидкие и твердые продукты, образующие при подготовке, транспортировке и переработке углеводородного или другого органического топлива (газы процессов промышленной подготовки природных углеводородов, коксовый газ, водородсодержащий газ пиролиза углеводородов, доменные и конверторные газы, отходы лесохимической промышленности);
- Тепловые ВЭР - тепло отходящих газов, отработанных теплоносителей (вода, водяной пар);
- ВЭР давления - потенциальная энергия газовых и жидкостных потоков с давлением, превышающем атмосферное

### 3.3. Технологические характеристики топлива

#### 3.3.1. Теплотворная способность топлива (теплота сгорания) Q

- это количество теплоты, выделяющийся при полном сгорании (окислении) единицы массы или объема топлива. Для газа часто теплотворную способность рассчитывают на  $1 \text{ м}^3$ .

Теплота сгорания [15]

Теплота сгорания — количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании (окислении) единицы массы или объема топлива. Применительно к топливам в технике применяется также термин «теплотворная способность». Она измеряется при одинаковой температуре горючей смеси и продуктов сгорания. Ее определяют при стандартных условиях сгорания [ $T_{\text{СГ}} = 298,15 \text{ К}$  ( $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ),  $P_{\text{СГ}} = 101,325 \text{ кПа}$ ] и стандартных условиях измерений [ $T_{\text{с}} = 273,15 \text{ К}$  ( $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и  $293,15 \text{ К}$  ( $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ),  $P_{\text{с}} = 101,325 \text{ кПа}$ , влажность равна нулю].

Различают высшую и низшую теплоту сгорания. Высшая теплота сгорания  $Q_{\text{В}}$  представляет собой количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании единицы топлива и нахождении образовавшейся воды в жидком состоянии. Высшая теплота сгорания определяется, как правило, в калориметрической бомбе при сжигании топлива в атмосфере кислорода.

Низшая теплота сгорания  $Q_{\text{н}}$  определяется в предположении, что продукты сгорания, которые могут конденсироваться при низких температурах, уходят из тепловой машины в испаренном состоянии. Применительно к углеводородным топливам она равна тепловому эффекту реакции, при которой теплота образования паров воды считается потерянной и потому вычитается из высшей теплоты сгорания.

Теплота сгорания топлив определяется составом горючей массы и содержанием балласта. Топлива, вырабатываемые из нефти, природного и нефтяного газов, в основном состоят из углерода и водорода при

незначительном содержании гетероорганических соединений и растворенных газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  и др.). По теплоте сгорания горючие элементы топлив различаются весьма существенно: для водорода (на единицу массы) она примерно в 4 раза больше, чем для углерода, и в 15 раз больше, чем для серы.

Определение теплоты сгорания экспериментальным путем регламентируется для газов ГОСТ 10062–75 (в калориметрической бомбе) и ГОСТ 27193–86 (в калориметре), для жидких нефтепродуктов – ГОСТ 21261–91, определение по которому основано на сжигании навески топлива в калориметрической бомбе под давлением 2,5–3,0 МПа в атмосфере кислорода и поглощении выделившегося тепла водой в калориметре.

Теплота сгорания индивидуальных углеводородов. При заданном числе атомов углерода в молекуле углеводорода наибольшую на единицу массы высшую и низшую теплоту сгорания имеют парафиновые, несколько меньшую — олефиновые и нафтеновые, наименьшую — ароматические углеводороды. При  $n \rightarrow \infty$  низшая теплота сгорания углеводородов всех гомологических рядов стремится к значению  $Q_H = 43\,840$  кДж/кг (рис. 3.1).

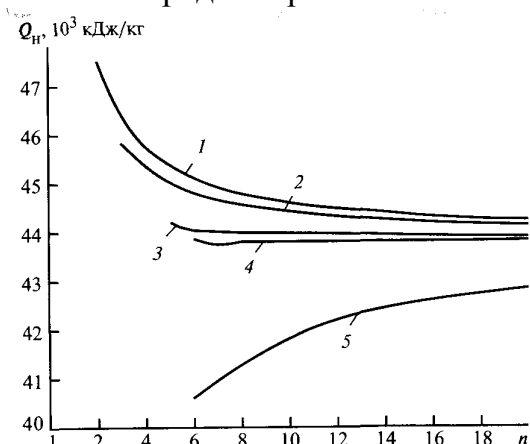


Рис. 3.1. Зависимость низшей удельной теплоты сгорания ( $Q_H$ ) углеводородов при  $t = 25^\circ\text{C}$  от числа атомов углерода  $n$  в молекуле:

1 — парафиновые  $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ ; 2 — олефиновые  $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ ; 3 — циклопентановые  $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ ; 4 — циклогексановые  $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ ; 5 — ароматические  $\text{C}_n\text{H}_{2n-6}$  углеводороды

Изомерные углеводороды по сравнению с углеводородами нормального строения при одинаковом числе атомов углерода в молекуле имеют, как правило, более низкую теплоту сгорания, ее уменьшение может достигать приблизительно 33 500 кДж/кмоль, т.е. составляет менее 1 % теплоты сгорания соответствующего углеводорода нормального строения.

В тех случаях, когда нет возможности экспериментально определять теплоту сгорания, ее рассчитывают, используя эмпирические уравнения, точность которых, как правило, достаточна для технических целей.

Высшая теплота сгорания углеводородов в газообразном состоянии при температуре  $25^\circ\text{C}$  может быть вычислена по уравнению

$$\tilde{Q}_v = 204\,200N + 44\,400Z + C, \quad (6.2)$$

где  $Q_v$  — высшая мольная теплота сгорания, кДж/кмоль, при температуре 298,16 К;  $N$  — число атомов кислорода, необходимое для полного сгорания углеводорода;  $Z$  — число молей образующейся воды;  $C$  — стериическая характеристика, постоянная в пределах гомологического ряда; значения  $N$ ,  $Z$  и  $C$  приведены в табл. 6.6. Уравнение (6.2) может быть приведено к виду

$$Q_v = (657\,000n + B + C)/(12,01115n + 1,00797m), \quad (6.3)$$

где  $Q_v$  — высшая удельная теплота сгорания углеводорода в стандартных условиях, кДж/кг;  $n$  и  $m$  — число атомов углерода и водорода в молекуле углеводорода;  $B$  — постоянная для данного гомологического ряда.

Расчет по уравнениям (6.2) и (6.3) дает весьма точные результаты. Погрешность расчета менее 0,5 %, и только для отдельных углеводородов она несколько больше, что связано, вероятно, с неточным экспериментальным определением теплоты сгорания.

Для вычисления низшей теплоты сгорания углеводородов рекомендуется уравнение

$$\tilde{Q}_n = \tilde{Q}_v - 22\,020m, \quad (6.4)$$

где  $\tilde{Q}_n$  и  $\tilde{Q}_v$  — низшая и высшая мольная теплота сгорания углеводорода в стандартных условиях, кДж/кмоль;  $m$  — число атомов водорода в молекуле углеводорода.

Теплота сгорания многокомпонентных топлив. Для природного, нефтяного и нефтезаводских газов, а также вырабатываемых из них товарных продуктов: сжиженного и сжатого природного газа, сжиженного нефтяного газа, ШФЛУ, АСКТ и других аналогичных продуктов — наиболее простым и доступным способом определения теплоты сгорания является вычисление ее как суммы теплот сгорания входящих в состав газа индивидуальных химических соединений:

$$Q = \sum_{i=1}^N Q_i \frac{X_i M_i}{\sum_{i=1}^N X_i M_i} = \sum_{i=1}^N g_i Q_i, \quad (6.5)$$

где  $Q$  и  $Q_i$ ; — удельная теплота сгорания топлива и  $i$ -го компонент соответственно, кДж/кг;  $X_i$  и  $g_i$  — мольная и массовая доля  $i$ -го компонента;  $M_i$  — молекулярная масса  $i$ -го компонента.

Для расчетов, не требующих высокой точности, низшую объемную теплоту сгорания природных газов можно определять по известной высшей по уравнениям, рекомендованным в ГОСТ 10062–75:

для сухого природного газа (без учета содержания влаги)

$$Q_n^c = 0,905 Q_v^c; \quad (6.7)$$

для сухого нефтяного газа

$$Q_n^c = 0,9152 Q_v^c; \quad (6.8)$$

для перехода к рабочим условиям с учетом влажности газа

$$Q_{v(n)}^p = Q_{v(n)}^c (1 - 1,3356 W), \quad (6.9)$$

где  $W$  — влажность газа при 20 °С и давлении 0,101325 МПа, кг/м<sup>3</sup>.

Для расчетного определения теплоты сгорания неидентифицированных топлив предложено большое число эмпирических уравнений.

Они основаны на связи теплоты сгорания с элементарным составом, плотностью, анилиновой точкой, показателем преломления и другими физико-химическими свойствами топлива.

Для природного газа и продуктов его переработки при неизвестном компонентном составе ГОСТ 30319.1 – 96 допускается определение удельной объемной теплоты сгорания при 20 °С по уравнениям:

$$Q'_в = 92,819(0,51447\rho_c + 0,05603 - 0,65689x_a - x_y); \quad (6.10)$$

$$Q'_н = 85,453(0,52190\rho_c + 0,04242 - 0,65197x_a - x_y), \quad (6.11)$$

где  $Q'_в$  и  $Q'_н$  — высшая и низшая теплота сгорания, кДж/м<sup>3</sup>;  $\rho_c$  — плотность газа при 20 °С и давлении 0,101325 МПа, кг/м<sup>3</sup>;  $x_a$  и  $x_y$  — мольные доли азота и диоксида углерода в газе соответственно.

Высшая теплота сгорания природных газов в зависимости от их плотности  $\rho$  и содержания инертных газов  $S_{ин}$  может быть с достаточной для технических целей точностью определена по номограмме, приведенной на рис. 6.3. Для определения теплоты сгорания соединяют вертикальной линией точку на оси абсцисс, соответствующую относительной плотности газа при 20 °С и давлении 0,101 МПа, с прямой, соответствующей известному содержанию инертных компонентов ( $N_2 + CO_2$ ). Ордината точки пересечения показывает значение теплоты сгорания.

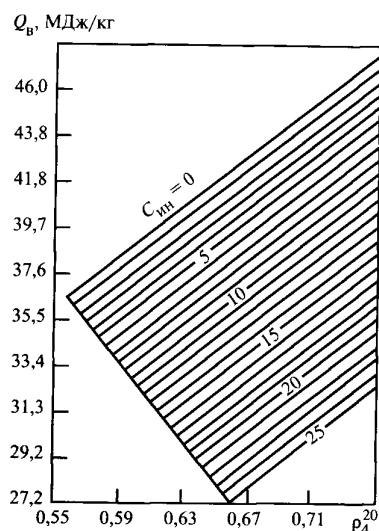


Рис. 3.2. Зависимость высшей теплоты сгорания природных газов от их относительной плотности  $\rho_4$  и содержания инертных газов  $S_{ин}$ , % (об.)

### 3.3.2. Жаропроизводительность топлива (максимальная температура, $t_{max}$ )

-это наивысшая температура, которую теоретически можно достигнуть при количественном сжигании топлива в адиабатических условиях, когда потери тепла равны нулю, а тепло, выделившееся при сгорании топлива, полностью идет на нагрев продуктов сгорания.

Максимальную температуру, которую продукты сгорания достигают при полном сгорании топливозвоздушной смеси стехиометрического состава, принято называть жаропроизводительностью. При этом температура топлива и воздуха принимается равной 0 °С и не учитываются потери тепла на диссоциацию продуктов сгорания.

Для расчета жаропроизводительности  $t_{ж}$  углеводородовоздушных смесей рекомендуется использовать уравнение [7.1, 7.2]:

$$t_{ж} = t' \left( 0,1 + \frac{0,9 Q_H}{(Q_C g_C + Q_{H_2} g_{H_2})} \right), \quad (7.7)$$

в котором

$$t' = \frac{t_{жC}}{1 + Q_{H_2} g_{H_2} / (Q_C g_C)} + \frac{t_{жH_2}}{1 + Q_C g_C / (Q_{H_2} g_{H_2})}, \quad (7.8)$$

где  $t'$  — в °С;  $Q_H$  — низшая теплота сгорания топлива;  $Q_C$  — теплота сгорания углерода в виде графита;  $Q_{H_2}$  — низшая теплота сгорания газообразного молекулярного водорода;  $g_C$  и  $g_{H_2}$ ,  $t_{жC}$  и  $t_{жH_2}$  — массовые доли и жаропроизводительность углерода и молекулярного водорода.

Учитывая, что  $Q_C = 32\,783$  кДж/кг,  $Q_{H_2} = 119\,910$  кДж/кг,  $t_{жC} = 2175$  °С,  $t_{жH_2} = 2235$  °С и  $g_C + g_{H_2} = 1$ , уравнения (7.7) и (7.8) приводим к следующему виду:

$$t_{ж} = t' \left( 0,1 + \frac{Q_{H_2}}{36\,425(1 - g_{H_2}) + 133\,233 g_{H_2}} \right), \quad (7.9)$$

где

$$t' = \frac{2175}{(1 + 3,6577 g_{H_2}) / (1 - g_{H_2})} + \frac{2235}{1 + 0,2734(1 - g_{H_2}) / g_{H_2}}. \quad (7.10)$$

Различия в жаропроизводительности углеводородов значительны только у первых членов гомологических рядов. При увеличении числа атомов углерода в молекуле различия между углеводородами сглаживаются и при  $n \rightarrow \infty$  жаропроизводительность углеводородов всех гомологических рядов асимптотически приближается примерно к 2140 °С. Изомеризация углеводородов не сказывается на жаропроизводительности  $t_{ж}$  вследствие того, что теплота изомеризации весьма невелика по сравнению с теплотой сгорания.

Жаропроизводительность углеводородов в газообразном состоянии примерно на 15 °С выше, чем в жидком. При сжигании углеводорода в воздухе, содержащем 1 % влаги по массе,  $t_{ж}$  будет примерно на 40 °С ниже, чем при сжигании его в абсолютно сухом воздухе. Значения  $t_{ж}$  углеводорода

в твердом и жидком состоянии примерно одинаковые. Природные газы, содержащие в основном метан и не содержащие влагу, имеют  $t_{ж} = 2045\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 3.3.3. Стехиометрический коэффициент

Стехиометрический коэффициент — отношение массы окислителя, необходимого для полного сгорания топлива, к массе этого топлива. Смесь топлива с окислителем, состав которой отвечает стехиометрическому коэффициенту, называется стехиометрической.

Стехиометрический коэффициент углеводородных топлив, кг окислителя/ кг топлива, определяется по уравнению

$$L_0 = 8(g_C/3 + g_H)/\psi_K, \quad (7.1)$$

где  $g_C, g_H$  — соответственно массовая доля углерода и водорода в топливе;  $\psi_K$  — массовое содержание кислорода в окислителе, для воздуха  $\psi_K = 0,232$ .

Для кислородсодержащих топлив с приведенной формулой  $C_nH_mO_k$  стехиометрический коэффициент определяется как

$$L_0 = 8(g_C/3 + g_H - g_O/8)/\psi_K \quad (7.2),$$

или

$$L_0 = 32(n + m/4 - k/2)/(M_T \psi_K), \quad (7.3)$$

где  $M_T$  — молекулярная масса топлива;  $n, m, k$  — число атомов углерода, водорода и кислорода в приведенной формуле топлива.

В теплотехнических расчетах иногда используют стехиометрический коэффициент, выраженный через мольные  $L_M$  или объемные  $L_V$  единицы измерения, а именно:

$$L_M = M_T L_0 / M_0 \quad (7.4)$$

$$L_V = \rho_T L_0 / \rho_0, \quad (7.5)$$

где  $M_T$  и  $M_0$  — соответственно молекулярная масса топлива и окислителя;  $\rho_T$  и  $\rho_0$  — плотность топлива и окислителя,  $\text{кг/м}^3$ .

При увеличении числа атомов углерода в молекуле стехиометрический коэффициент уменьшается у парафиновых углеводородов, остается неизменным у олефиновых и нафтеновых и возрастает у ароматических углеводородов. При  $n \rightarrow \infty$  стехиометрический коэффициент стремится к значению, равному  $14,75\text{ кг воздуха / кг топлива}$ .

Значения стехиометрического коэффициента\* для газовых и легких углеводородных топлив и спиртов приведены в табл. 7.1.

Избыток (или недостаток) окислителя по отношению к массе его в стехиометрической смеси оценивается коэффициентом избытка окислителя (для топливовоздушных смесей — коэффициентом избытка воздуха):

$$\alpha = G_0 / (L_0 G_T), \quad (7.6)$$

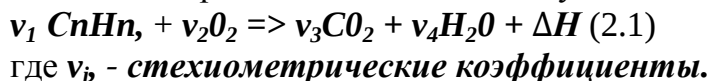
где  $\alpha$  — коэффициент избытка окислителя (воздуха);  $G_0, G_T$  — масса окислителя и топлива в смеси соответственно.

Горючую смесь, для которой  $a < 1$ , называют богатой, а при избытке окислителя, т.е. при  $a > 1$ , — бедной.

### 3.4. Термодинамические расчеты в энергосбережении

Самым простым и распространенным путем получения из топлива тепла является сжигание топлива. Как правило, сжигание топлива проводят в воздухе, в котором содержание кислорода составляет около 21% об. Все реакции горения любых видов топлива в кислороде являются **экзотермическими**, т.е. протекание таких реакций сопровождается выделением тепла. Тепловой эффект реакции зависит от условий, в которых протекает реакция горения. Поэтому тепловые эффекты при постоянном объеме или постоянном давлении различны. Выделяющееся тепло реакции, если она проводится при постоянном давлении, называют **энтальпией** и обозначают  $\Delta H$ .

Например, реакцию сжигания углеводородного топлива общей формулы  $C_nH_m$  в кислороде ( $O_2$ ) до углекислого газа ( $CO_2$ ) и воды ( $H_2O$ ) в химической термодинамике принято записывать следующим образом:



#### 3.4.1. Законы Г.И. Гесса

Количество тепла, которое можно получить из топлива, вычисляют согласно термохимическим законам Г.И. Гесса. На основе экспериментальных данных было установлено, что тепловой эффект химической реакции не зависит от пути (механизма) реакции, а определяется только природой и состоянием исходных реагентов и конечных продуктов реакции.

В соответствии с законами Гесса, теплота любой химической реакции ( $\Delta H$ ) равна сумме теплот образования конечных продуктов  $(v_i^n \Delta H^{обр})_n$  за минусом суммы теплот образования исходных веществ  $(v_i^n \Delta H^{обр})_и$

$$\Delta H = \sum (v_i^n \Delta H^{обр})_n - \sum (v_i^n \Delta H^{обр})_и$$

Для сопоставления протекания различных реакций используют стандартные значения теплоты образования соединений. Стандартной теплотой образования соединения называют теплоту реакции образования одного моля конкретного соединения из простых веществ в стандартных условиях и обозначают символом  $(\Delta H_T^0)^{обр}$ . Теплота образования из простых веществ для углеводородов означает образование из углерода (C) и водорода ( $H_2$ ). Стандартные значения теплоты образования различных соединений содержатся в специальных справочниках. В них для температуры 298K

(25°C) и давления 1 атм приведены стандартные значения теплоты образования разнообразных химических соединений и органических топлив, которые обозначаются СИМВОЛОМ ( $H^{\circ}298^{обP}$ )-

### 3.4.2. Зависимость теплоты реакции от температуры

Большинство данных по теплоте реакций, приведенных в справочной литературе, относится к температуре 298К. Для расчета энтальпии (теплого

эффекта) реакции при другой температуре используют уравнение Кирхгофа в интегральном виде:

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p dT \quad (2.3)$$

где  $C_p$  - изменение теплоемкости при постоянном давлении в интервале температур от 298К до Т.

Из уравнения видно, что для определения теплового эффекта реакции при температуре Т, необходимо знать его величину при другой температуре, например, при 298К, и зависимость теплоемкостей реагентов и продуктов реакции в температурном интервале от 298К до Т.

### 3.4.3. Теплоемкость вещества

—это физическая величина, характеризующая способность вещества увеличивать свою температуру при нагреве. Теплоемкость вещества при постоянном давлении ( $C_p$ ) выражается отношением энтальпии к температуре (дифференциальное уравнение Кирхгофа):

$$C_p = (\partial H / \partial T)_p \quad (2.4)$$

и численно равна количеству тепла, которое необходимо для нагревания единицы массы вещества на 1 градус. Наиболее употребительной единицей измерения  $C_p$  является *кал/моль град* или *Дж/моль-град*.

Теплоемкость i-го вещества зависит от температуры. Поэтому в термохимических и теплотехнических расчетах используют либо экспериментальные значения  $C_p$  для различных температур, либо проводят ее расчет по уравнению:

$$C_p^i = a^i + b^i T + c^i T^2 \quad (2.5)$$

Теплоемкость – отношение количества теплоты, сообщаемой веществу в термодинамическом процессе, к изменению его температуры. Теплоемкость вещества в разных процессах изменения его состояния может меняться от положительного значения (изотермический процесс с подводом тепла) до отрицательного (изотермический процесс с отводом тепла). В адиабатическом процессе теплоемкость равна нулю.

При заданной температуре теплоемкость углеводородов в жидком состоянии убывает, а паров возрастает по мере увеличения массы молекулы углеводорода. При заданном числе атомов углерода в молекуле пары парафиновых углеводородов имеют наибольшую теплоемкость, а ароматических – наименьшую. Нафтеновые углеводороды занимают промежуточное положение. Изомерные углеводороды имеют меньшую теплоемкость по сравнению с углеводородами нормального строения.

Теплоемкость многокомпонентных топлив зависит от углеводородного и фракционного состава. Чем больше в топливе парафиновых и олефиновых и меньше ароматических углеводородов, тем выше теплоемкость топлива. Следует иметь в виду, что теплоемкость любого вида топлива (если это не индивидуальный углеводород) не остается строго постоянной величиной из-за различий в составе топлива. Однако влиянием изменения химического и фракционного состава на теплоемкость в пределах одного сорта топлива можно пренебрегать, так как расхождение значений обычно меньше, чем при экспериментальном ее определении.

Зависимость теплоемкости жидких углеводородов от давления пренебрежимо мала при температурах значительно ниже критической.

На базе индивидуальных углеводородов могут быть получены топлива самого разнообразного компонентного состава. Все композиции обследовать экспериментально не представляется возможным, поэтому на практике часто используют расчетные значения теплоемкости.

Один из наиболее точных методов расчетного определения теплоемкости жидких индивидуальных углеводородов основан на учете вклада в теплоемкость определенных групп атомов [6.11]. Вклад группы в теплоемкость углеводорода определяется по полиному

$$c_{гр} = (A + BT + CT^2 + DT^3) \frac{4,1868}{M}. \quad (6.22)$$

Теплоемкость углеводорода определяется как сумма вкладов в теплоемкость всех групп атомов, из которых состоит вещество.

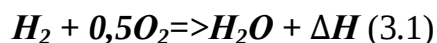
## ЛЕКЦИЯ 4. Сжигание горючих газов в кислороде

### 4.1. Водород

Водород входит в состав разнообразных газов нефтегазопереработки и нефтегазохимии, угле- и коксохимии. Так, водород содержат газы процесса риформинга бензиновых фракций нефти, паро-воздушной конверсии метана, коксовый и водяной газы. Кроме того, водород содержат все виды углеводородного топлива.

Поэтому вполне логичным представляется начать рассмотрение процессов горения с наиболее простого представителя горючих газов -молекулярного водорода ( $H_2$ ).

Стехиометрическое уравнение реакции горения (глубокого окисления) молекулярного водорода имеет вид:



Реакция экзотермическая, ее протекание сопровождается выделением тепла  $\Delta H$ . Найдем энтальпию реакции (3.1) по уравнению ( $\Delta H = \sum(v_i^n \Delta H_{\text{обр}}^0)_n - \sum(v_i^u \Delta H_{\text{обр}}^0)_u$ ), для чего воспользуемся справочными данными, представленными в табл. 3.1.

Из табл. 3.1 видно, что стандартная энтальпия образования простых веществ ( $H_2$ ,  $O_2$  и др.) в термохимических расчетах принимается равной 0 ккал/моль. Энтальпия реакции сжигании 1 моля  $H_2$  ( $\approx 22,4$  л), например, при 400К составляет около 58 ккал или примерно 243 кДж. На основе данных табл. 4.1 легко оценить, что при сжигании 1 м<sup>3</sup> и 1 кг  $H_2$  выделяется около 2590 и 29020 ккал или 10840 и 121420 кДж соответственно.

Таблица 4.1. Стандартные состояния исходных реагентов и продуктов реакции  $H_2 + 0,5O_2 \rightarrow H_2O$

| Т, К | Экспериментальные данные |                                  |                         |                                  |                         |                                  | Реакция<br>(3.1)              |
|------|--------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
|      | <b>H<sub>2</sub></b>     |                                  | <b>O<sub>2</sub></b>    |                                  | <b>H<sub>2</sub>O</b>   |                                  |                               |
|      | Ср.<br>кал/моль<br>град  | $\Delta H_T^0$ обр,<br>ккал/моль | Ср,<br>кал/моль<br>град | $\Delta H_T^0$ обр,<br>ккал/моль | Ср,<br>кал/моль<br>град | $\Delta H_T^0$ обр,<br>ккал/моль | $\Delta H_T^0$ ,<br>ккал/моль |
| 298  | 6,892                    | 0,000                            | 7,017                   | 0,000                            | 8,03                    | -57,80                           | -57,80                        |
| 400  | 6,974                    | 0,000                            | 7,194                   | 0,000                            | 8,19                    | -58,04                           | -58,04                        |
| 600  | 7,008                    | 0,000                            | 7,670                   | 0,000                            | 8,68                    | -58,50                           | -58,50                        |
| 800  | 7,078                    | 0,000                            | 8,064                   | 0,000                            | 9,25                    | -58,91                           | -58,91                        |
| 1000 | 7,217                    | 0,000                            | 8,335                   | 0,000                            | 9,85                    | -59,24                           | -59,24                        |

#### 4.1.1. Высшая и низшая теплота сгорания топлива

В теплотехнике при сжигании водородсодержащего топлива (например, углеводов), когда одним из продуктов реакции является вода, различают высшую и низшую теплоты сгорания топлива.

Под низшей теплотой сгорания ( $Q_H$ ), применительно к реакции (3.1) понимают теплоту реакции горения водорода  $\Delta H^\circ$ , когда продукт реакции  $H_2O$  находится в виде водяного пара.

Под высшей теплотой сгорания ( $Q_B$ ) применительно к реакции (3.1), понимают теплоту реакции горения водорода  $\Delta H^\circ$ , когда образующийся продукт реакции - водяной пар находится в виде сконденсировавшейся воды.

Высшая теплота сгорания по значению больше низшей теплоты сгорания на теплоту фазового перехода воды в водяной пар ( $\Delta H_{ФП}$ ), т.е. на теплоту испарения воды (или конденсации водяного пара).

$$Q_B - Q_H = \Delta H_{ФП} \quad (3.2);$$

Уравнение Кирхгофа для процесса испарения воды (вода  $\Rightarrow$  пар) в дифференциальном виде можно записать так:

$$d\Delta H_{ФП}/dT = C_p^{\text{пар}} - C_p^{\text{вода}} \quad (3.3)$$

Это уравнение не вполне строго, поскольку записано для  $p=\text{const}$ , и не учитывает изменение давления водяного пара в зависимости от температуры.

Однако, если давление не слишком велико, то теплоемкость пара можно считать не зависящей от давления. Дополнительно примем, что теплоемкости пара и воды в узком интервале температур (например, 298-400K) от него не зависят и равны соответственно  $C_p^{\text{пар}} \approx 8,1$  кал/моль·град;  $C_p^{\text{вода}} \approx 18,1$  кал/моль·град.

Тогда по уравнению (3.3):

$$d\Delta H_{ФП}/dT = 8,1 - 18,1 \approx -10,0 \text{ кал/моль·град.} \quad (3.4)$$

При температуре 298K теплота испарения воды равна  $\Delta H_{ФП}^{298} = 10,55$  ккал/моль. Легко показать, что при 400K теплота испарения равна:

$$\Delta H_{ФП}^{400} = \Delta H_{ФП}^{298} - 10(400-298) \approx 10550 - 1000 \approx 9550 \text{ кал/моль.} \quad (3.5)$$

При 400K получим:

$$Q_B - Q_H = \Delta H_{ФП} \approx 9,55 \text{ ккал/моль.} \quad (3.6)$$

С учетом данных табл. 3.1 видно, что при 400K  $Q_B \approx 67,5$  ккал/моль. Таким образом, отношение высшей теплоты реакции к низшей для реакции горения водорода в кислороде при 400K равно:

$$Q_B/Q_H \approx 1,16,$$

т.е. высшая теплота реакции больше низшей теплоты реакции примерно на 16%. Поскольку теплота испарения (конденсации) воды и теплоемкость водяного пара зависят от температуры, то, очевидно, при другой температуре это соотношение будет другим. Например, при температуре 298К  $Q_B > Q_H$  на 18%.

Следует отметить, что в теплотехнических расчетах обычно пользуются низшей теплотой сгорания.

#### 4.1.2. Жаропроизводительность

Попробуем оценить максимальную температуру ( $t_{max}$ ) адиабатического разогрева продукта сгорания (водяного пара), образующегося при сжигании пода в кислороде или жаропроизводительность. Для адиабатических условий протекания экзотермической стехиометрической реакции окисления водорода можно записать следующее соотношение (3.8):

$$t_{max(H_2+O_2)} = \Delta H^\circ / n \cdot C_p \quad (3/8)$$

где  $n$  – число молей газовой смеси;  
 $C_p$  – теплоемкость газовой смеси.

Возникает вопрос, какие значения подставить в числитель и знаменатель уравнения (3.8). Дело в том, что энтальпия реакции окисления молекулярного водорода кислородом и теплоемкость единственного продукта реакции - водяного пара зависят от температуры. Поэтому, наиболее надежные данные по жаропроизводительности (температуре адиабатического разогрева) можно получить лишь экспериментально, проведя реакцию в калориметрической бомбе с фиксированием температуры адиабатического разогрева реакционной смеси оптическим пирометром или термопарой.

Однако приближенная оценка жаропроизводительности все-таки возможна. Примем, что средняя температура сжигания определенного количества водорода в кислороде в соответствии со стехиометрическим уравнением реакции составляет около 1000К. Это значение можно объяснить тем, что температура горения  $H_2$  в  $O_2$  в процессе горения изменяется от некоторой начальной температуры, когда степень превращения  $H_2$  близка к 0, например, до некой конечной температуры в конце процесса горения, когда степень превращения водорода становится близка к 100%, а температура продуктов реакции приближается к  $t_{max}$ .

Затем из табл. 3.1 выберем значения энтальпии реакции и теплоемкостей исходных реагентов и продукта реакции при температуре 1000К. Учитывая близость значений  $C_p$  для  $H_2$ ,  $O_2$  и  $H_2O$  примем среднюю теплоемкость газовой смеси в процессе горения равной теплоемкости водяного пара.

Тогда, для одного моля газовой смеси получим:

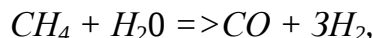
$$t_{\max (H_2+O_2)} = \Delta T_p^{\circ} / C_{P(H_2O)} \approx 59240 / 9,85 \approx 6000K \quad (3.9)$$

Из приведенной оценки видно, что жаропродуцируемость молекулярного водорода, как газообразного топлива, при сжигании его в чистом кислороде, иначе говоря, в пламени водород-кислородной горелки, температура теоретически может достигать 6000K.

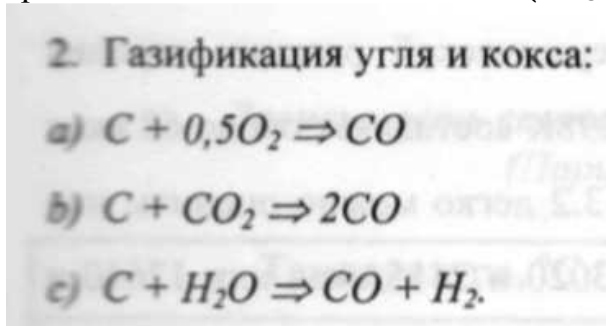
## 4.2. Оксид углерода

Оксид углерода (**CO**) - горючий газ, который получается в следующих процессах:

### 1. Каталитическая конверсия природного метана водяным паром

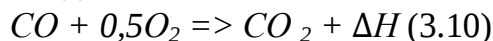


в результате чего образуется синтез-газ (смесь **CO** и **H<sub>2</sub>**) - сырье для промышленного синтеза метанола (**CH<sub>3</sub>OH**) и аммиака (**NH<sub>3</sub>**).



В результате этих реакций получается **CO** или смесь его с **H<sub>2</sub>**. Реакции газификации сопутствуют таким технологическим процессам, как выплавка чугуна и стали (реакция (а) и (б) - доменный, конверторный и коксовый газы), генераторный газ - реакция (с).

Стехиометрическое уравнение реакции горения (глубокого окисления) оксида углерода имеет вид:



Реакция экзотермическая, ее протекание сопровождается выделением тепла **ΔH**. Найдем энтальпию реакции (3.10) по уравнению (2.2), для чего воспользуемся справочными данными, представленными в табл. 4.2.

Таблица 4.2 Стандартные состояния исходных реагентов и продуктов реакции  $H_2 + 0,5O_2 \Rightarrow H_2O$

| Т. К | CO           |                                                | O <sub>2</sub> |                                                | CO <sub>2</sub> (ид. газ) |                                                | Реакция<br>(3.10) |
|------|--------------|------------------------------------------------|----------------|------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------|-------------------|
|      | Ср.<br>кал/м | ΔH <sub>T</sub> <sup>0</sup> обр,<br>ккал/моль | Ср.<br>кал/м   | ΔH <sub>T</sub> <sup>0</sup> обр,<br>ккал/моль | Ср.<br>кал/моль           | ΔH <sub>T</sub> <sup>0</sup> обр,<br>ккал/моль |                   |

|      | оль град |        | ль град |       | град  |        | ь      |
|------|----------|--------|---------|-------|-------|--------|--------|
| 298  | 6,97     | -26,42 | 7,017   | 0,000 | 8,87  | -94,05 | -67,63 |
| 400  | 7,01     | -26,32 | 7,194   | 0,000 | 9,87  | -94,07 | -67,75 |
| 600  | 7,28     | -26,33 | 7,670   | 0,000 | 11,31 | -94,12 | -67,79 |
| 800  | 7,62     | -26,52 | 8,064   | 0,000 | 12,29 | -94,22 | -67,70 |
| 1000 | 7,93     | -26,77 | 8,335   | 0,000 | 12,97 | -94,32 | -67,55 |

Из табл. 4.2 видно, что энтальпия экзотермической реакции горения 1моля СО ( $\approx 22,4$  л) в кислороде, например, при 298К составляет около 68 ккал или примерно 283 кДж. На основе данных табл. 3.2 легко можно оценить, что при сжигании 1 м<sup>3</sup> и 1 кг СО выделяется около 3020 и 2415 ккал или 12640 и 10100 кДж соответственно.

Для реакции сжигания СО в кислороде с позиции теплотехники характерно наличие только одной теплоты сгорания топлива, поскольку топливо не содержит водород, следовательно, в продуктах реакции отсутствует водяной пар.

Оценим жаропроизводительность оксида углерода при горении его в кислороде в расчете на 1 моль газовой смеси. Для этого воспользуемся данными табл. 3.2 при 1000К для энтальпии реакции, а среднюю теплоемкость примем равной теплоемкости СО<sub>2</sub>. После подстановки соответствующих значений в уравнение получим:

$$t_{\max}(\text{CO}_2 + \text{O}_2) = \Delta T / C_{P(\text{CO}_2)} \approx 67550 / 12,97 \approx 5200\text{K}$$

Из приведенной оценки видно, что жаропроизводительность оксида углерода, как газообразного топлива, при сжигании его в чистом кислороде теоретически может достигать 5200 К.

Отметим, что при температуре горения, превышающей 1700°C, всегда приходится считаться с протеканием реакций диссоциации продуктов горения. Речь прежде всего идет о реакции распада молекул СО<sub>2</sub> и Н<sub>2</sub>О на СО и О<sub>2</sub> или Н<sub>2</sub> и О<sub>2</sub> соответственно. Реакции диссоциации молекул эндотермические, поэтому практически достижимая жаропроизводительность будет существенно ниже ее теоретической величины.

Для парциального давления СО<sub>2</sub> в продуктах сгорания около 0,2 атм степень диссоциации (%) составит (табл. 4.3).

Таблица 4.3 Зависимость степени диссоциации СО<sub>2</sub> от температуры (Парциальное давление СО<sub>2</sub> 0,2 атм)

| Температура, °С | Степень диссоциации, % |
|-----------------|------------------------|
| 1800            | 3,7                    |
| 1900            | 6,0                    |
| 2000            | 10                     |
| 2100            | 15                     |
| 2200            | 23                     |
| 3000            | 90                     |

Парциальное давление  $\text{CO}_2$  в продуктах сгорания также влияет на степень диссоциации угольной кислоты (табл. 4.4). Водяной пар при тех же температурах и давлениях диссоциирует в значительно меньшей степени, чем молекулы  $\text{CO}_2$  (табл. 4.5).

Таблица 4.4 Зависимость степени диссоциации  $\text{CO}_2$  от его парциального давления (Температура 2000 град)

| Парциальное давление $\text{CO}_2$ , атм | Степень диссоциации, % |
|------------------------------------------|------------------------|
| 1,0                                      | 6,0                    |
| 0,2                                      | 10,0                   |
| 0,1                                      | 12,5                   |

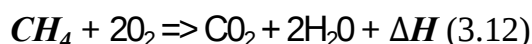
Таблица 4.5 Зависимость степени диссоциации  $\text{H}_2\text{O}$  от его парциального давления (Температура 2000 град)

| Парциальное давление $\text{CO}_2$ , атм | Степень диссоциации, % |
|------------------------------------------|------------------------|
| 1,0                                      | 2,0                    |
| 0,2                                      | 3,5                    |
| 0,1                                      | 4,0                    |

Из данных табл. 4.4 и 4.5 видно, что при 2000°C степень диссоциации  $\text{H}_2\text{O}$  почти в 3 раза меньше, чем  $\text{CO}_2$ .

### 4.3. Метан

Стехиометрическое уравнение реакции горения метана ( $\text{CH}_4$ ) - основного компонента природного газа - имеет вид:



Реакция экзотермическая, ее протекание сопровождается выделением тепла  $\Delta H$ . Найдем энтальпию реакции (3.12). Для чего воспользуемся справочными данными, представленными в табл. 3.6, из которой видно, что при 1000К в реакции горения 1 моля  $\text{CH}_4$  ( $\approx 22,4$  л) выделяется около 192 ккал (и 803 кДж). На основе данных табл. 4.6 легко оценить, что при сжигании 1 м<sup>3</sup> и 1 кг  $\text{CH}_4$  выделяется около 8570 и 12000 ккал или 35900 и 50200 кДж соответственно.

Таблица 4.6 Стандартные состояния исходных реагентов и продуктов реакции

| К   | $\text{CH}_4$           |                               | $\text{CO}_2$           |                               | $\text{H}_2\text{O}$    |                               | Реакция<br>(3.12) |
|-----|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------|
|     | Ср.<br>кал/моль<br>град | $\Delta H_f^0$ ,<br>ккал/моль | Ср.<br>кал/моль<br>град | $\Delta H_f^0$ ,<br>ккал/моль | Ср.<br>кал/моль<br>град | $\Delta H_f^0$ ,<br>ккал/моль |                   |
| 298 | 8,54                    | -17,89                        | 8,87                    | -94,05                        | 8,03                    | -57,80                        | -191,76           |
| 400 | 9,71                    | -18,63                        | 9,87                    | -94,07                        | 8,19                    | -58,04                        | -191,52           |

|      |       |        |       |        |      |        |         |
|------|-------|--------|-------|--------|------|--------|---------|
| 600  | 12,55 | -19,90 | 11,31 | -94,12 | 8,68 | -58,50 | -191,22 |
| 800  | 15,18 | -20,82 | 12,29 | -94,22 | 9,25 | -58,91 | -191,22 |
| 1000 | 17,40 | -21,40 | 12,97 | -94,32 | 9,85 | -59,24 | -191,40 |

Оценим высшую и низшую теплоту сгорания метана в кислороде для температуры 298К, при которой теплота испарения воды равна  $\Delta H_{\text{фп}}^{298} = 10,55$  ккал/моль. Из стехиометрического уравнения реакции горения метана в кислороде видно, что мольная доля водяных паров в продуктах горения составляет примерно 0,67. Поэтому в самом грубом приближении для 298К можно записать:

$$Q_{\text{В}} - Q_{\text{Н}} = 0,67\Delta H_{\text{фп}} \approx 7 \text{ ккал/моль.} \quad (3.13)$$

С учетом данных табл. 3.1 и 3.2  $Q_{\text{В}} \approx 199$  ккал/моль.

Таким образом, соотношение высшей и низшей теплоты сгорания для реакции горения метана в кислороде при 298К равно:

$$\frac{Q_{\text{В}}}{Q_{\text{Н}}} \approx 1,04 \quad (3.13)$$

т.е. высшая теплота реакции больше низшей теплоты реакции примерно на 4%.

По аналогии с вышеизложенным проведем приближенный расчет  $t_{\text{max}}$  сгорания 1 моля  $\text{CH}_4$  в кислороде, для чего воспользуемся уравнением (3.12).

Из табл. 4.6 возьмем значения энтальпии реакции и теплоемкостей исходных реагентов и продукта реакции при температуре 1000К. В процессе горения средняя теплоемкость исходной стехиометрической смеси ( $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ ) меняется до средней теплоемкости образующихся продуктов реакции ( $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ). Так, при температуре 1000К средняя мольная теплоемкость исходной смеси ( $C_{p(\text{И})}$ ) и продуктов реакции ( $C_{p(\text{П})}$ ) равна:

$$C_{p(\text{И})} = (C_{p(\text{CH}_4)} + 2 C_{p(\text{O}_2)})/3 \approx 11,4 \text{ кал/моль·град} \quad (3.15)$$

$$C_{p(\text{П})} = (C_{p(\text{CO}_2)} + 2 C_{p(\text{H}_2\text{O})})/3 \approx 10,9 \text{ кал/моль·град} \quad (3.16)$$

Учитывая близость значений  $C_{p(\text{И})}$  и  $C_{p(\text{П})}$  примем среднюю теплоемкость газовой смеси в процессе горения ( $C_p$ ) равной 11,1 кал/моль·град.

Тогда получим:

$$t_{\text{max}(\text{CH}_4 + \text{O}_2)} = \Delta H^{\circ}_p / n \cdot \bar{C}_p \approx 191400 / 3 \cdot 11,1 \approx 5750\text{К} \quad (3.17)$$

Из приведенного расчета видно, что в самом грубом приближении жаропродуцируемость метана, как газообразного топлива, при сжигании его в чистом кислороде теоретически составит примерно 5750К.

Расчетные максимальные температуры, достигаемые при количественном сгорании  $H_2$ ,  $CH_4$  и  $CO$  в кислороде, равны 6000, 5750 и 5200К соответственно и образуют следующий ряд:

$$t_{max}(H_2+O_2) > t_{max}(CH_4+O_2) > t_{max}(CO+O_2) \quad (3.18)$$

Этот ряд является свидетельством того, что жаропродуцируемость газообразного топлива тем выше, чем больше водорода в нем содержится. Действительно чистый водород содержит 100% H, метан - 25% H,  $CO$  - 0% H.

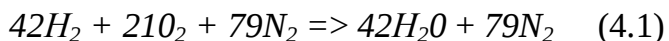
Становится понятным почему, когда говорят об энергетике будущего, то прежде всего имеют в виду водородную энергетику, как наиболее эффективную и экологически чистую, поскольку теоретически единственным продуктом горения  $H_2$  является вода.

## ЛЕКЦИЯ 5. Сжигание горючего в воздухе

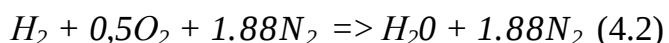
В промышленности, энергетике, на транспорте и в быту почти повсеместно сжигание топлива осуществляют в воздухе. При этом газообразное топливо, его расход удобно измерять в  $\text{м}^3$ . Для простоты теплотехнических расчетов принимают следующий состав атмосферного воздуха (% об.):  $\text{O}_2$ -21,  $\text{N}_2$  - 79. Это означает, что на  $1,00 \text{ м}^3$  молекулярного кислорода в воздухе приходится около  $3,76 \text{ м}^3$  молекулярного азота.

### 5.1. Водород

В отличие от приведенной выше реакции (3.1) горения водорода в кислороде стехиометрическое горение водорода в воздухе можно записать в следующем виде:



Разделив левую и правую часть уравнения (4.1) на 42, получим:



Таким образом, из уравнения (4.2) видно, что для сжигания  $1 \text{ м}^3$  водорода по стехиометрии требуется  $2,38 (0,5 + 1,88) \text{ м}^3$  воздуха. Следует отметить, что по уравнению из  $1 \text{ м}^3 \text{ H}_2$  при количественном сгорании образуется  $1 \text{ м}^3$  водяного пара, то есть объем продуктов сгорания  $\text{H}_2$  в воздухе суммарно составляет примерно  $2,88 (1 + 1,88) \text{ м}^3$ .

Выше была найдена энтальпия реакции горения  $1 \text{ м}^3$  водорода, которая оказалась равной  $2590 \text{ ккал/м}^3$ . Легко видеть, что в расчете на  $1 \text{ м}^3$  образующихся продуктов сгорания энтальпия составит  $2590/2,88 \approx 900 \text{ ккал/м}^3$ .

Попытаемся теоретически оценить жаропроизводительность сжигания  $1 \text{ м}^3 \text{ H}_2$  в воздухе. Для этого воспользуемся немного видоизмененным уравнением:

$$t_{\max(H_2+\text{возд.})} = \Delta H^0 / V_{\Pi} \cdot \bar{C}_p \quad (4.3),$$

где  $\Delta H^0$  - стандартная энтальпия реакции горения  $H_2$  в  $O_2$  при температуре 1000K, ккал/м<sup>3</sup> (табл. 3.1);

$V_{\Pi}$ , стехиометрический объем продуктов сгорания  $H_2$  в воздухе, м<sup>3</sup>;

$\bar{C}_p$  – средняя теплоемкость продуктов сгорания, ккал/м<sup>3</sup>·град.

Затем из табл. 3.1 выберем значения энтальпии реакции и теплоемкостей исходных реагентов и продукта реакции при температуре 1000K (см. стр. 31). Учитывая близость значений  $C_p$  для  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  и  $H_2O$  примем среднюю теплоемкость газовой смеси в процессе горения равной теплоемкости водяного пара при 1000K, а именно  $C_p = 9,85$  кал/моль·град или 0,44 ккал/м<sup>3</sup>·град.

Тогда получим:

$$t_{\max(H_2+\text{возд.})} \approx 900/0,44 \approx 2050K \quad (4.4)$$

В принципе такое значение жаропроизводительности следовало ожидать. За счет увеличения объема продуктов сгорания водорода в воздухе до 2,88 м<sup>3</sup>, по сравнению с объемом продуктов сгорания  $H_2$  в чистом кислороде (1,0 м<sup>3</sup>), жаропроизводительность снизилась тоже почти в три раза с 6000 до 2050K.

## 5.2. Метан

В отличие от приведенной выше реакции (3.12) горения метана в кислороде стехиометрическое горение метана в воздухе можно записать следующим образом:



Таким образом, для сжигания 1 м<sup>3</sup>  $CH_4$  необходимо 9,52 м<sup>3</sup> воздуха. При количественном протекании реакции образуется 10,52 м<sup>3</sup> продуктов сгорания. Найденная выше энтальпия реакции горения 1 м<sup>3</sup> метана равняется 8750 ккал/м<sup>3</sup> или 36580 кДж/м<sup>3</sup>. Легко видеть, что в расчете на 1 м<sup>3</sup> образующихся продуктов сгорания энтальпия составит 8750/10,5  $\approx$  830 ккал/м<sup>3</sup>.

Оценим в первом приближении жаропроизводительность сжигания  $1 \text{ м}^3 \text{ CH}_4$  в воздухе.

Для этого воспользуемся уравнением вида:

$$t_{\max(\text{H}_2+\text{возд.})} = \Delta H^\circ / V_{\text{п}} \cdot \bar{C}_p \quad (4.6)$$

где  $\Delta H^\circ$  - стандартная энтальпия реакции горения  $\text{CH}_4$  в  $\text{O}_2$  при температуре, например,  $298^\circ\text{K}$ , ккал/ $\text{м}^3$  (табл. 3.6);

$V_{\text{п}}$ , стехиометрический объем продуктов сгорания  $\text{CH}_4$  в воздухе,  $\text{м}^3$ ;

$\bar{C}_p$  – средняя теплоемкость продуктов сгорания, ккал/ $\text{м}^3 \cdot \text{град}$ .

Из табл. 3.6 выберем значения энтальпии реакции и теплоемкостей исходных реагентов и продуктов реакции при температуре  $298\text{K}$ . Учитывая близость значений  $C_p$  для  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  примем среднюю теплоемкость газовой смеси в процессе горения равной теплоемкости водяного пара при  $298 \text{ K}$ , а именно  $C_p = 8,03 \text{ кал/моль-град}$  или  $0,36 \text{ ккал/м}^3 \cdot \text{град}$ . Тогда получим:

$$t_{\max(\text{H}_2+\text{возд.})} \approx 816/0,36 \approx 2300 \text{ K} \quad (4.7)$$

За счет увеличения объема продуктов сгорания метана в воздухе до  $\approx 10,5 \text{ м}^3$ , по сравнению с объемом продуктов сгорания  $\text{CH}_4$  в чистом кислороде ( $3,0 \text{ м}^3$ ), жаропроизводительность снизилась с  $5750$  до  $2300\text{K}$ .

### 5.3. Теплота сгорания жидких углеводородов

Большинство жидких нефтяных и газоконденсатных топлив представляют собой природную смесь углеводородов различного строения и молекулярной массы. Основными видами жидкого топлива являются: бензин автомобильный и авиационный, авиационный и осветительный керосин, дизельное топливо летнее, зимнее и арктическое, печное и котельное (мазут) топлива.

Теплоту сгорания углеводородных топлив (энтальпию сгорания) можно определить экспериментально методом бомбовой калориметрии. Калориметрическая бомба представляет собой, как правило, толстостенный цилиндрический сосуд, погруженный в сосуд с перемешиваемой жидкостью. Из рис. 5.1 видно, что бомба представляет собой прочный стальной сосуд, погруженный в воду. Тепло, выделяющееся при сгорании точной навески вещества, определяют по подъему температуры калориметра. Типичная процедура сжигания топлива в калориметрической бомбе следующая. В чашку для образца помещается определенное количество горючего вещества из расчета  $1 \text{ г}$   $1/3$  л емкости бомбы. Для насыщения внутреннего объема

бомбы парами воды вносят дополнительно 1 г воды на 1/3 емкости бомбы. Затем в бомбе создается давление кислорода около 3,0 МПа (30 атм). Включается мешалка и определяется начальная температура. Затем с помощью электрической дуги поджигают вещество в чашке и фиксируют температуру. Образующийся в результате горения вещества  $CO_2$  поглощается водой.

Однако всегда следует считаться с тем, что смесь продуктов сгорания и не вступившего в реакцию  $O_2$  в бомбе не является идеальным газом. Поэтому в наблюдаемые измерения вносят необходимые поправки, а по повышению температуры судят о количестве выделившегося тепла при сгорании вещества. Очевидно, что тепловой эффект при сжигании в бомбе калориметра определяется при постоянном объеме. Поэтому значение теплового эффекта реакции ( $Q_p$ ) обычно пересчитывают на постоянное давление, получая в результате  $Q_p = \Delta H$ .

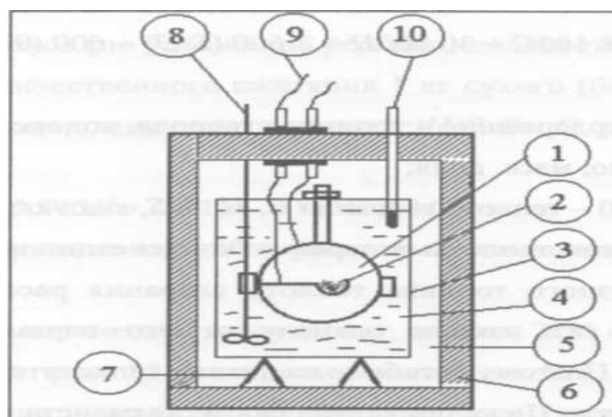


Рис. 5.1 Схема калориметрической бомбы для определения теплоты сгорания топлива 1 - калориметрическая бомба, 2-чашечка для образца, 3-оболочка калориметра, 4 - вода, 5 -воздух, 6- изолирующий корпус, 7- подставка, 8-мешалка, 9-электропровода для поджигания образца, 10- термометр

Современные калориметрические методы позволяют определять количество выделяющегося в калориметре тепла с точностью 0,01%.

Углеводороды в калориметрической бомбе количественно сгорают до  $CO_2$  и  $H_2O$ . Наличие в исходном углеводородном сырье топливного азота в виде органических N-содержащих соединений в процессе сжигания приводит к образованию оксида азота и азотной кислоты. Сера, входящая в состав углеводородных топлив, при сжигании образует  $SO_2$ .

#### 5.4. Формула Д.И. Менделеева для вычисления теплоты сгорания топлива

Высшую ( $Q_B$ ) и низшую ( $Q_H$ ) теплоту сгорания твердых и жидких нефтяных топлив, состоящих из углерода (C), водорода (H), серы (S) и кислорода (O), молекулярная структура которых неизвестна, можно рассчитать по формуле Д.И. Менделеева:

$$Q_B = 8\,100C + 30\,000H + 2\,600(S-O) \quad (4.8)$$

$$Q_H = 8\,100C + 30\,000H + 2\,600(S-O) - 600(9H + W) \quad (4.9)$$

где C, H, S, O, W - содержание в топливе углерода, водорода, серы, кислорода и воды соответственно, масс, доля;

8 100, 30 000 и 2 600 - теплота сгорания C, H и S, ккал/кг;

600 - среднее значение теплоты испарения /конденсации воды, ккал/кг.

Для газообразного топлива теплоту сгорания рассчитывают для 1 м<sup>3</sup>. Теплота сгорания газа сильно зависит от его параметров: температуры, давления, состава. Поэтому, чтобы рассчитать теплоту сгорания, необходимо задать параметры газа. Ниже приведена формула расчета применительно к 1 м<sup>3</sup> природного газа при 273K и 1 атм:

$$Q_H = 8\,555CH_4 + 15\,226C_2H_6 + 21\,795C_3H_8 + 28\,338C_4H_{10} + 2\,579H_2 + 3\,018CO + 5\,585H_2S \quad (4.10)$$

где  $Q_H$  - низшая теплота сгорания газообразного топлива, ккал/м<sup>3</sup>;

$CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_3H_8$ ,  $C_4H_{10}$ ,  $H_2$ ,  $CO$  и  $H_2S$  - содержание компонентов газообразного

топлива, об. доли.

Числовые коэффициенты перед газообразными компонентами равны низшей теплоте их сгорания, ккал/м<sup>3</sup>.

Стехиометрический (по уравнению реакции) объем воздуха ( $L_0$ ), необходимого для количественного сжигания 1 кг сухого (безводного) топлива, в состав которого входят следующие элементы: H, C, S и O, равен:

$$L_0 = 0,089H + 0,267C + 0,033(S-O), \text{ м}^3 \quad (4.11)$$

где H, C, S и O - содержание в топливе указанных элементов соответственно, % масс;

0,089; 0,267 и 0,033 - объем в м<sup>3</sup> воздуха состава: 21% об. O<sub>2</sub> и 79% об. N<sub>2</sub>, необходимого для сжигания 10 г каждого из элементов H, C и S соответственно.

Стехиометрическое (по уравнению реакции) количество воздуха в кг ( $L_0$ ), необходимое для количественного сжигания 1 кг сухого (безводного) топлива, в состав которого входят следующие элементы: H, C, S и O, равно:

$$L_0 = 0,345H + 0,115C + 0,043(S-O), \text{ кг}, \quad (4.12)$$

где H, C, S и O - содержание в топливе указанных элементов соответственно, % масс;

0,345; 0,115 и 0.043 - количество воздуха в кг, состава 21% об.  $O_2$  и 79% об.  $N_2$ , необходимого для сжигания 10 г каждого из элементов  $H$ ,  $C$  и  $S$  соответственно.

Для обеспечения полного сжигания любого вида углеводородного топлива фактическое количество воздуха больше стехиометрического.

Фактический расход воздуха ( $L$ ) определяют в долях от стехиометрического и рассчитывают по уравнению:

$$L = L_0 a \quad (4.13)$$

где  $a$  - коэффициент избытка воздуха.

Значение  $a$  всегда больше 1. Величина коэффициента избытка воздуха зависит от вида топлива и типа используемых горелок. Так, для газомазутных горелок с паровым распылением мазута (т.е. распылением водяным паром)  $a = 1,3 \div 1,4$ ; для тех же горелок, но с воздушным распылением мазута  $a = 1,2 \div 1,3$ ; для горелок беспламенного горения  $a = 1,02 \div 1,10$ .

Количество дымовых газов, получающихся при сгорании 1 кг сухого углеводородного топлива с его воздушным распылением, равно:

$$G = 1 + L_0 a \quad (4.14)$$

## ЛЕКЦИЯ 6. Энергетический и тепловой балансы

### 6.1. Закон А. Эйнштейна

В большинстве теплоэнергетических производств стоимость исходного топлива составляет значительную часть производственных издержек. Поэтому при оценке и практическом осуществлении того или иного энерготехнологического процесса необходимо добиться максимально эффективного использования сырья и энергии.

Поэтому важнейшим этапом при рассмотрении любого энерготехнологического процесса является составления теплового и материального балансов процесса. В самом общем случае справедлив закон А. Эйнштейна, согласно которому *полная энергия тела пропорциональна его массе*:

$$E = mc^2 \quad (5.1)$$

где:  $E$  - энергия,  $m$  - масса,  $c$  - скорость света в вакууме, равная  $\approx 3 \cdot 10^8$  м/с.

Прежде чем перейти к составлению теплового баланса попробуем оценить с помощью закона Эйнштейна энергию покоя (всю внутреннюю энергию), которой обладает любое топливо, в том числе и углеводородное, массой 1 г. Тогда получим:

$$E \approx 10^{-3} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \approx 9 \cdot 10^{10} \text{ кДж} \quad (5.2)$$

Попробуем более наглядно представить 90 млрд. кДж. Всегда достаточно трудно говорить о больших цифрах, поскольку большим цифрам нелегко найти аналогии в жизни. Например, 90 млрд. лет или 90 млрд. долларов или 90 млрд. кДж. С чем их сравнить, со средней продолжительностью жизни человека, со студенческой стипендией, с энтальпией реакции горения метана, которая составляет 50 кДж/г?

Если принять, что теплотворная способность лучшего российского малосернистого мазута (*LSFO - Low Sulphur Fuel Oil*) составляет около  $4 \cdot 10^4$  кДж/кг, то вся внутренняя энергия 1 г того же мазута примерно равна количеству энергии, которое выделится при сжигании 2250 т мазута (или состава из 45 железнодорожных цистерн). Сравните: 1 г и 45 железнодорожных цистерн мазута!

Эффективность расхода энергии в энерготехнологическом процессе устанавливается с помощью энергетического баланса. Основой его служит закон Эйнштейна. Однако когда в теплоэнергетической системе отсутствуют ядерные превращения, величина энергии в соотношении Эйнштейна с точностью по порядку величины  $10^9$  кДж/г постоянна.

Поэтому ниже и далее мы будем составлять не энергетический, а тепловой баланс.

## 6.2. Уравнение теплового баланса в общем виде

Уравнение баланса или просто баланс в физике, химии или экономике описывается простой формулой, которую в самом общем виде можно записать:

$$\text{Приход} - \text{Расход} = \text{Накопление}$$

Теплоэнергетическая установка - это своеобразный проточный химический реактор, в котором протекает реакция горения органического топлива.

Поэтому естественно к такой установке применить подход, обычно используемый в химической технологии при составлении теплового и материального балансов химических реакторов.

Составим тепловой баланс топки энергетической установки (печи) (Рис. 6.1)



Рис. 6.1. Тепловой баланс топki энергетической установки (печи)

С учетом возможных фазовых переходов как исходного органического топлива (например, испарения жидкого мазута -  $Q_{фп}$ ), так и продуктов сгорания (например, конденсации паров воды +  $Q_{фп}$ ) уравнение теплового баланса топki для нестационарного режима примет вид:

$$Q_{ВХ} + Q_{РГ} - Q_{ВЫХ} - Q_{ТП} \pm Q_{ФП} = Q_{НАК} \quad (5.3)$$

Составляя такой баланс необходимо учитывать отклонения теоретических тепловых эффектов отдельных стадий процесса. Отклонения возникают по следующим причинам: (\*)термодинамическое равновесие не позволяет проводить реакцию горения до конца; (\*\*) вследствие относительно низких скоростей реакций не достигается полное сжигание топлива; (\*\*\*) часть топлива и/или тепла расходуется на протекание побочных реакций с образованием, например, токсичных продуктов сгорания; (\*\*\*\*) часть топлива или окислителя берется в избытке.

### 6.3. Диаграммы энергетического и материального потоков

Полосовые диаграммы потоков энергии и тепла (диаграммы Сенке) давно и широко применяют в энергетике. На этих диаграммах потоки энергии изображаются полосами, ширина которых пропорциональна соответствующим величинам энергии. Направление каждого потока энергии указывается стрелкой.

В силу закона сохранения энергии полосы на диаграмме Сенке не могут менять свою ширину. Но они могут разделяться и сливаться. Такие диаграммы служат также для демонстрации перехода одного вида энергии в другой.

Следует отметить, что полосовые диаграммы также используются и для потоков вещества.

На рис. 6.2. приведена диаграмма Сенке, отражающая в определенном масштабе потоки тепла для некоторой печи. На входе в печь имеем два тепловых потока:  $Q_{ВХ}$  - нагретая топливно-воздушная смесь, тепло реакции горения этой смеси  $Q_{РГ}$ . Выходят из печи три потока тепла:  $Q_{ВЫХ}$  – полезная теплота дымовых газов (продуктов сгорания),  $Q_{ФП}$  - теплота со знаком (-) предположительно израсходованная, например, на испарение топлива (мазута),  $Q_{тп}$  - потери тепла через стенку печи и/или рекуператора и/или теплообменника. При этом  $Q_{ФП}$  и  $Q_{тп}$  представляют потери тепла.

В уравнении теплового баланса учитываются все потоки тепла, как входящие в топку, так и выходящие из нее. Если принять для стационарного режима работы печи  $Q_{НАК} = 0$ , то исходя из рис. 6.2. и сделанных предположений по закону сохранения энергии можно записать:

$$Q_{ВХ} + Q_{РГ} = Q_{ВЫХ} + Q_{ТП} + Q_{ФП} \quad (5.4)$$

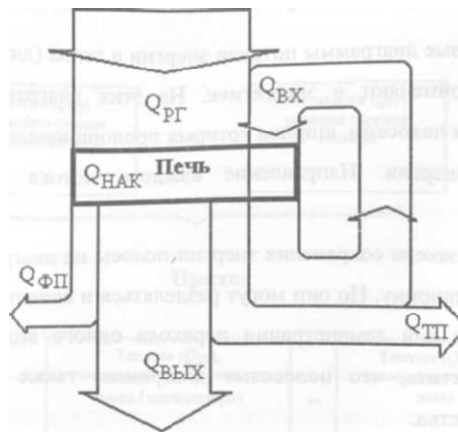


Рис. 6.2. Поточная диаграмма Сенке для теплового баланса печи

#### 6.4. Энергетический (тепловой) КПД

Определим тепловой КПД печи в %, как отношение суммы полезно использованных энергий к сумме полных энергетических затрат

$$\eta = \Sigma Q_{\text{пиз}} / \Sigma Q_{\text{пэз}} \cdot 100\% \quad (5.5)$$

Применительно к рассматриваемой печи имеем:

Из рис. 6.2. видно, что КПД печи существенно меньше 100%.

#### 6.5. Тепловой баланс печи в неизотермическом режиме идеального перемешивания

Расшифруем слагаемые уравнения теплового баланса печи, работающей в неизотермическом режиме реактора идеального перемешивания.

При составлении балансовых уравнений в качестве элементарного объема берут элементарный объем топки, работающий в режиме полного перемешивания.

$$Q_{pg} = \Delta H_{pg} \cdot V_{top} \cdot r_{pg} \cdot dt \quad (5.9)$$

где  $\Delta H_{pg}$  – энтальпия реакции горения 1 м<sup>3</sup> топлива, кДж/м<sup>3</sup>;

$V_{top}$  – объем топки, м<sup>3</sup>;

$r_{pg}$  – скорость реакции горения, ч<sup>-1</sup> (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>·ч).

$\rho_{вх}$  – средняя плотность топливно-воздушной смеси на входе в топку, кг/м<sup>3</sup>;

$$Q_{вых} = \nu_{вых} \cdot C_{p(вых)} \cdot \rho_{вых} \cdot T_{вых} \cdot dt \quad (5.8)$$

где  $\nu_{вых}$  – объемная скорость продуктов сгорания топливно-воздушной смеси на выходе из топки, м<sup>3</sup>/ч;

$C_{p(вых)}$  – средняя теплоемкость продуктов сгорания топливно-воздушной смеси на выходе из топки, Дж/кг·град;

$\rho_{вых}$  – средняя плотность продуктов сгорания топливно-воздушной смеси на выходе из топки, кг/м<sup>3</sup>;

$T_{вых}$  – средняя температура продуктов сгорания топливно-воздушной смеси на выходе из топки, °С.

Тогда тепловые потоки за момент времени  $dt$  для объема топки ( $V_{top}$ )

$$Q_{\text{ТП}} = K_T \cdot F_{\text{ТО}} \cdot \Delta T \cdot dt \quad (5.10)$$

где  $K_T$  – коэффициент теплопередачи, Дж/м<sup>2</sup>·°С;

$F_{\text{ТО}}$  – поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;

$\Delta T$  – средняя разность температур в топке и внешней среды, °С;

$$Q_{\text{ФП}} = \Delta H_{\text{ФП}} \cdot dt \quad (5.11)$$

где  $Q_{\text{ФП}}$  – теплота фазового перехода топлива и/или продуктов сгорания, кДж;

$\Delta H_{\text{ФП}}$  – энтальпия фазового перехода топлива и/или продуктов сгорания, кДж/ч;

$$Q_{\text{НАК}} = d(V_{\text{ТОП}} \cdot C_{P(\text{ВЫХ})} \cdot \rho_{\text{ВЫХ}} \cdot T_{\text{ВЫХ}}) \quad (5.12)$$

Итак, уравнение теплового баланса топки для нестационарного режима примет вид :

$$\begin{aligned} & \nu_{\text{ВХ}} \cdot C_{P(\text{ВХ})} \cdot \rho_{\text{ВХ}} \cdot T_{\text{ВХ}} + \Delta H_{\text{РГ}} \cdot V_{\text{ТОП}} \cdot r_{\text{РГ}} - \nu_{\text{ВЫХ}} \cdot C_{P(\text{ВЫХ})} \cdot \rho_{\text{ВЫХ}} \cdot T_{\text{ВЫХ}} - K_T \cdot F_{\text{ТО}} \cdot \Delta T \pm \\ & \Delta H_{\text{ФП}} = V_{\text{ТОП}} d(C_{P(\text{ВЫХ})} \cdot \rho_{\text{ВЫХ}} \cdot T_{\text{ВЫХ}})/dt \end{aligned} \quad (5.13)$$

В стационарном режиме правая часть уравнения (5.13) равна нулю. Если принять, что  $\nu_{\text{ВХ}} = \nu_{\text{ВЫХ}}$  и  $\rho_{\text{ВХ}} = \rho_{\text{ВЫХ}}$  и  $C_{P(\text{ВХ})} = C_{P(\text{ВЫХ})}$ , то для стационарного режима можно записать:

$$\nu \cdot C_P \cdot \rho \cdot (T_{\text{ВХ}} - T_{\text{ВЫХ}}) + \Delta H_{\text{РГ}} \cdot V_{\text{ТОП}} \cdot r_{\text{РГ}} - K_T \cdot F_{\text{ТО}} \cdot \Delta T \pm \Delta H_{\text{ФП}} = 0 \quad (5.14)$$

Для последующего анализа уравнения (5.14) его удобнее записать в следующем виде:

$$\nu \cdot C_P \cdot \rho \cdot T_{\text{ВХ}} + \Delta H_{\text{РГ}} \cdot V_{\text{ТОП}} \cdot r_{\text{РГ}} \pm \Delta H_{\text{ФП}} - K_T \cdot F_{\text{ТО}} \cdot \Delta T = \nu \cdot C_P \cdot \rho \cdot T_{\text{ВЫХ}} \quad (5.15)$$

Из уравнения (5.15) видно, что эффективность сжигания топлива в топке определяется энтальпией реакции горения топлива ( $\Delta H_{\text{РГ}} \cdot V_{\text{ТОП}} \cdot r_{\text{РГ}}$ ). Чем энтальпия выше, т.е. чем полнее протекает реакция горения топлива, и чем оно

калорийнее, тем больше тепла выделяется при сжигании единицы топлива и тем выше температура выходящих продуктов сгорания ( $T_{\text{ВЫХ}}$ ).

Эффективность сжигания топлива в печи уменьшается с ростом тепловых потерь через стенку ( $K_T F_{\text{ТО}} \Delta T$ ).

В случае использования жидкого топлива эффективность снижается вследствие затрат тепла на испарение мазута, а повышается в случае конденсации водяного пара из продуктов сгорания. Поэтому знак (+) или (-)  $\Delta H_{фп}$  в уравнении определяется балансом, например,  $(+\Delta H_{фп})$  - если тепло, выделившееся при конденсации водяного пара, превысит тепло, затраченное на испарение мазута, и  $(-\Delta H_{фп})$  - если наоборот.

Аналогично рис. 6.2 выглядят поточная диаграмма Сенке материального баланса по воде для теплоэлектростанции (ТЭС), приведенная на рис. 6.3.

В уравнении материального баланса (по воде) учитываются все потоки воды на входе в ТЭС и на выходе из нее. В приведенной на рис. 6.3 схеме для охлаждения воды ТЭС используют градирню (Г). Для стационарного режима работы ТЭС накопление воды в ТЭС ( $M_{НАК}^{ж}$ ) равно 0.

Из представленной на рис. 6.3 диаграммы в силу закона сохранения массы вещества можно записать:

$$M_{ВХ}^{ж} - M_{ВЫХ}^{ж} = M_{НАК}^{ж} \quad (5.16)$$

В ТЭС поступает холодный водяной поток ( $M_{ВХ}^{ж}$ ), состоящий из «свежей» воды речного водозабора ( $M_{р}^{ж}$ ) и циркулирующей воды ( $M_{ц}^{ж}$ ), охлажденной в градирне (Г).

Если пренебречь потерями воды в ТЭС при производстве тепловой и электрической энергии, то количество выходящей горячей воды ( $M_{ВЫХ}$ ) равно:

$$M_{ВХ} = M_{р}^{ж} + M_{ц}^{ж} = M_{ВЫХ}^{ж} \quad (5.17)$$

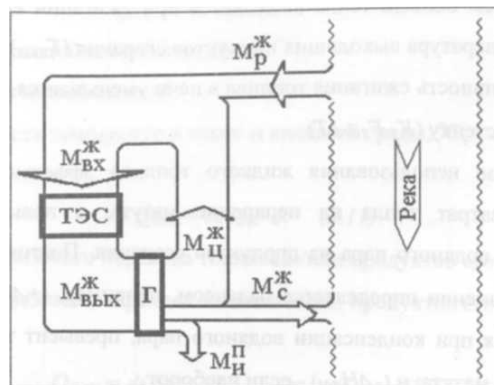


Рис. 6.3. Поточная диаграмма Сенке для материального баланса ТЭС по воде

Охлаждение воды ТЭС в градирне перед ее частичным сбросом в водоем ( $M_{с}^{ж}$ ) происходит за счет частичного испарения воды ( $M_{и}^{п}$ ). Тогда уравнение Для  $M_{ВЫХ}^{ж}$  примет вид :

$$M_{\text{ВЫХ}}^{\text{Ж}} = M_{\text{Ц}}^{\text{Ж}} + M_{\text{И}}^{\text{П}} + M_{\text{С}}^{\text{Ж}} \quad (5.18)$$

Из уравнений 5.17 и 5.18 можно вычислить количество воды  $M_{\text{И}}$ , теряющейся за счет испарения в градирне:

$$M_{\text{И}}^{\text{П}} = M_{\text{Р}}^{\text{Ж}} - M_{\text{С}}^{\text{Ж}} \quad (5.19)$$

Потеря воды компенсируется водозабором из реки.

## 6.6. Эксергия

Для анализа эффективности различных энерготехнологических схем превращения энергии и тепловых процессов часто используют понятие эксергии. Эксергия - это энергия, пригодная для использования. В процессах преобразования энергии она характеризует ее работоспособность. Совершенство аппаратов (печей, парогенераторов, паросиловых установок и др.), производящих тепло, оценивают *эксергетическим КПД*. Эксергию определяют через максимальную работу, которая может быть получена при обратимом переходе рассматриваемой системы в равновесное состояние с окружающей средой. Использование эксергии для термодинамического анализа называется *эксергетическим методом*.

Реально протекающие процессы необратимы. При совершении процесса качество эксергии понижается. Например, отработанный пар характеризуется более низкими значениями температуры и давления и вследствие этого может совершить меньше работы. Следить за потоками эксергии удобно с помощью *эксергетических диаграмм* Сенке.

Детальное рассмотрение эксергии и ее приложений для термодинамического анализа различных систем выходит за рамки курса «Основы ресурсо-энергосберегающих технологий углеводородного сырья». Более подробные сведения об эксергии содержатся в специальной литературе по технической термодинамике и теплотехнике.

## 6.7. Теоретические расчёты в энергосбережении

Конечное потребление энергии человеком, обществом или промышленным производством (тепло, свет, электричество, звук, движение и т.п.) всегда соответствовало уровню развития цивилизации. При этом добыча и производство энергоресурсов существенно, в несколько раз, превышает конечное потребление энергии. Это объясняется не столько недостатками существующих энергетических технологий, сколько фундаментальными ограничениями, связанными с самой природой процессов преобразования

энергии. Ниже показаны основные стадии преобразования энергии органического топлива в электроэнергию (рис. 6.4).

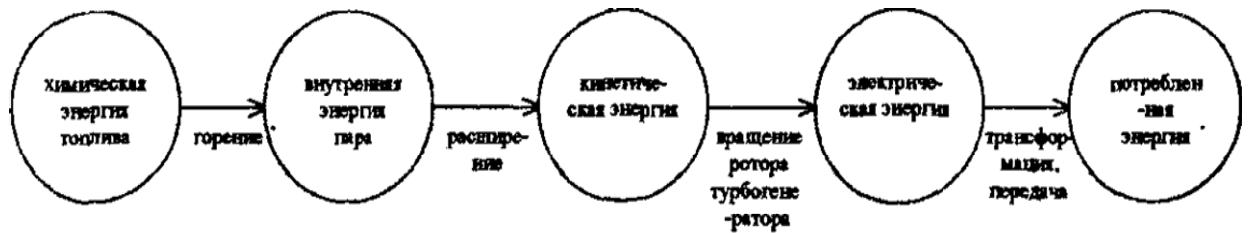


Рис. 6.4. Процедура преобразования энергии

Здесь указаны основные стадии преобразования энергии. Такие стадии присутствуют во многих типах энергетических установок. Закономерности преобразования энергии являются предметом термодинамики. Эта область науки сложилась еще в XIX веке. Но и сегодня основные ее законы составляют фундаментальные основы современных научных знаний. Для количественного сравнения различных способов преобразования энергии простейшим критерием служит коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{W}{E} 100\%,$$

где  $W$  - совершаемая полезная работа,  
 $E$  - затрачиваемая энергия.

Коэффициент полезного действия действующих энергетических установок отличается весьма значительно. Так, КПД тепловой конденсационной электростанции (КЭС) составляет около 40 %, теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) - 60 %, а дизельной электростанции (ДЭС) - 20%.

Простейшей моделью энергетической установки может служить схема, представленная на рисунке 6.5.

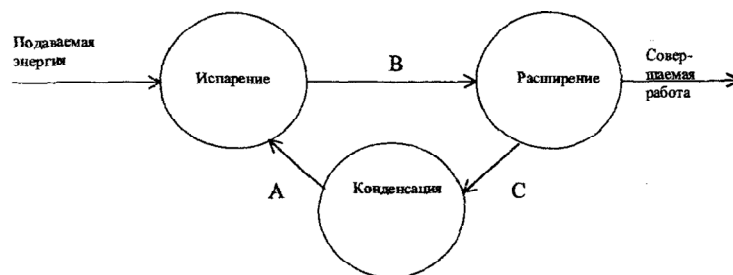


Рис. 6.5.

Рис. 6.5. Простейшая модель энергетической установки

В такой простейшей системе совершаются три основных процесса над рабочим телом: испарение, расширение, конденсация.

Стрелки, связывающие эти три процесса, показывают направление движения рабочего тела. Подводимая к системе энергия в виде сжигаемого топлива расходуется на испарение рабочего тела (воды). В точке В рабочим телом является пар с высокими температурой и давлением. Затем рабочее тело расширяется, вызывая вращение ротора турбогенератора - производя электрическую энергию. В точке С рабочее тело представляет собой пар, который имеет низкую температуру и очень низкое давление. В конденсаторе рабочее тело вновь переводится в жидкое состояние. Энергия, которую необходимо вывести из системы для конденсации пара, обычно отбирается охлаждающей циркуляционной водой. Возврат рабочего тела в парогенератор осуществляется питательным насосом. Количество подводимой к

системе энергии в сумме равно количеству отводимой энергии и совершаемой работы. Для изменения агрегатного состояния рабочего тела, его испарения или конденсации, необходимо подвести или отвести определенное количество энергии. А рабочее тело обладает свойством запасать энергию. Если изменение внутреннего состояния рабочего тела характеризовать количеством запасенной им энергии  $E$ , то математическое выражение первого начала термодинамики - закона сохранения энергии для системы, которая обменивается с внешней средой энергией в форме теплоты и работы  $W$ , выражается так:

$$Q = \Delta E + W,$$

где  $Q$  - теплота системы.

Коэффициент полезного действия энергетической установки всегда меньше 1. При  $h=1$  вся подводимая к системе энергия превращается в работу. Практически получить такой коэффициент полезного действия можно, но только не в циклическом процессе. Примером может служить изотермическое расширение газа. Оно может идти до того момента, пока давление не станет равно атмосферному. Но циклическую последовательность процессов, для которой  $Q=W$ , осуществить невозможно, хотя первому закону термодинамики это не противоречит. Это противоречит второму началу термодинамики: невозможно построить периодически действующую машину, все действие которой сводилось бы только к превращению теплоты, получаемой от источника, в работу.

Отвод определенного количества теплоты от рабочего тела к холодному источнику является необходимым условием осуществления цикла теплового двигателя. Работа в цикле равна разности подводимого и отводимого количества теплоты

$$W = Q_1 - Q_2.$$

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}. \quad (4.4)$$

Максимально возможный коэффициент полезного действия цикла энергетической установки в идеализированном случае определяется соотношением температур горячего  $T_1$  и холодного  $T_2$  источников:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Такая идеальная энергетическая установка носит название тепловой машины Карно. Работает эта машина следующим образом:

- рабочее тело адиабатически сжимается, температура растет до  $T_1$
- рабочее тело изотермически расширяется, совершая работу  $W$ ;
- рабочее тело адиабатически расширяется пока температура не снизится до  $T_2$ ;
- рабочее тело изотермически сжимается до тех пор, пока его внутренняя энергия не примет первоначальное значение, сбрасывая в холодный источник  $E$ .

Известно, что никакая другая машина не может иметь больший коэффициент полезного действия при тех же диапазонах температур. Значения  $\eta = 100\%$  соответствует условию:  $T_2 = 0$ , что принципиально не может быть достигнуто.

Реальные термодинамические циклы, используемые в реальных тепловых двигателях - двигателях внутреннего сгорания (циклы Отто, Дизеля, Ванкеля), паровые и газовые турбины (циклы Ренкина, Брайтона), холодильные машины и тепловые насосы могут весьма существенно отличаться своими массогабаритными характеристиками, экологическими и другими качественными свойствами. Однако экономические их характеристики показывают степень их приближения к идеалу.

Таким образом, процессы преобразования энергии всегда связаны с ее потерями. При этом значительная часть потерь определяется фундаментальными законами природы и, по-сути, задает технологический расход энергии в процессах ее преобразования. Другая часть потерь энергии связана с отклонениями реальных технологических процессов от идеала. Наконец, оставшаяся часть потерь определяется неправильной работой технологических установок, неверной настройкой технологического режима, холостыми пробегами оборудования, неэкономичной загрузкой или плохой изоляцией. Именно в этой, последней части следует в первую очередь искать наиболее эффективные решения по энергосбережению.

Применительно к электрической части энергетической установки, комплекса или системы повышение эффективности использования энергии чаще всего состоит в снижении потерь электроэнергии. Если на участке сети напряжение  $U$  с активным сопротивлением  $R$  протекает активная мощность  $P$  и реактивная  $Q$ , то потери электроэнергии  $\Delta A$  определяются так:

$$\Delta A = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R \tau,$$

где  $\tau$  - время максимальных потерь.

- Сразу становятся очевидными меры по снижению потерь в сетях:
- ✓ компенсация реактивной мощности;
  - ✓ повышение уровня напряжения сети;
  - ✓ увеличение сечения проводов для снижения сопротивления;
  - ✓ уменьшение дальности передачи - снижение сопротивления;
  - ✓ снижение времени потерь;
  - ✓ снижение максимума нагрузки.

Наиболее полное представление о состоянии добычи, производства, передачи и потребления энергоресурсов дает анализ баланса энергоресурсов. Баланс может быть составлен для любой энергоиспользующей установки, предприятия, территории, области, страны. Составление баланса энергии заключается в измерении и расчете потоков энергии по источникам и направлениям использования. Анализ баланса позволяет сопоставить полезное использование энергоресурсов и потери. Структурирование баланса обычно производится по видам используемых энергоресурсов, по энергоиспользующему оборудованию по цехам, корпусам, производствам, участкам, видам преобразованной энергии, видам продукции и т.п.

Баланс энергоресурсов в данном случае позволяет дать отчетливое представление от эффективности их использования. Так полный коэффициент полезного использования энергоресурсов составляет:

$$k = 1 - 0.66 = 0.34 \text{ (4.6.)}$$

Коэффициент использования энергоресурсов в потребительском комплексе (промышленность, транспорт, агропром, комбыт) равен:

$$k_{\text{эл}} = \frac{34 + 7.3 + 3.8 + 2.9 - 24}{34 + 7.3 + 3.8 + 2.9} = \frac{24}{48} = 50\% \quad (4.7.)$$

Коэффициент полезного использования энергии в энергетическом комплексе области (электростанции и котельные) составляет:

$$k_{\text{из}} = \frac{40+38-34}{40+38} = 0.56\%$$

Составление баланса энергоресурсов основывается на достоверном сборе информации о потоках энергии и их измерениях.

## 6.8. Энергетическая составляющая в себестоимости выпускаемой продукции

Предприятия и организации в процессе производства и реализации продукции и услуг расходуют сырье, материалы, топливо, энергию, амортизируют основные фонды, оплачивают труд работников, несут расходы по обслуживанию и управлению производством, реализации продукции, оплате услуг других организаций.

Совокупность всех текущих затрат на производство и реализацию продукции, выраженных в денежной форме, образует себестоимость этой продукции.

Себестоимость неразрывно связана со стоимостью продукции, являясь ее объективной основой и важнейшей частью.

Себестоимость является базой для установления цен и составляет наибольшую часть в структуре цен. Поэтому снижение себестоимости является основой для снижения цен, а правильное определение уровня себестоимости отдельных видов продукции - важный фактор совершенствования ценообразования.

Себестоимость продукции - важнейший качественный показатель, в котором отражаются все успехи и недостатки производственно-хозяйственной деятельности. Он отражает эффективность использования материальных и трудовых ресурсов, основных фондов, уровень организации производства и труда.

Снижение себестоимости продукции - важнейший источник роста прибыли.

По данным Министерства торговли США, для 86% промышленной продукции затраты на энергию в структуре ее себестоимости не превышают 5%. Интерес к энергосбережению у компаний-производителей такой продукции возникает только в условиях высоких и растущих цен на энергоносители, либо при ограничениях на их получение. В настоящее время, по оценкам экспертов, цены в США относительно низки, а поставки стабильны

Таблица 6.1. Сведения о потреблении энергоресурсов некоторыми промышленными предприятиями Томской области

| № и/ | Полное наименование | Затраты на | Доля затрат энергии в себестоимости продукции по видам энергии, % | Фондоотдача |
|------|---------------------|------------|-------------------------------------------------------------------|-------------|
|------|---------------------|------------|-------------------------------------------------------------------|-------------|

| л | предприятия                                        | все<br>виды<br>энергии<br>рубл<br>и<br>(1997<br>г.) |                             |     |                           |      |                    |                          |       | 1997г.,<br>%      |
|---|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------|-----|---------------------------|------|--------------------|--------------------------|-------|-------------------|
|   |                                                    |                                                     | элект<br>ро-<br>энерг<br>ия | газ | жидко<br>е<br>топлив<br>о | вода | уголь              | теплов<br>ая э<br>нергия | всего |                   |
| / | 2                                                  | 3                                                   | 4                           | 5   | 6                         | 7    | 8                  | 9                        | 10    | и                 |
| 1 | ОАО<br>«Сибэлектро-<br>мотор»                      | 1023<br>8                                           | М,                          |     |                           |      |                    | 5,7                      | 11,1  | 31                |
| 2 | ЗАО «Томский<br>электроламповый<br>завод»          | 1246<br>0                                           | 10,0                        | 4,0 |                           | 4,6  |                    | 1,3                      | 19,9  | 43                |
| 3 | НПЦ «Полус»                                        | 3379                                                | 4,48                        |     |                           | 1,75 |                    | 4,14                     | 10,37 | 55                |
| 4 | ОАО «Спичечная<br>фабрика «Сибирь»                 | 3385                                                | 5,8                         |     |                           | 1,4  | 4,6<br>(дрова<br>) | 9,2                      | 21    | 82                |
| 5 | ОАО «Томский<br>хим-фармзавод»                     | 2221                                                | 0,42                        |     |                           | 0,24 | 0,10               | 0,36                     | 1,12  | Нет<br>данны<br>х |
| 6 | ГП НПО<br>«Вирион»                                 | 3085                                                | 10,2                        | 4,5 |                           | 3,1  |                    |                          | 17,8  | 22                |
| 7 | ЗАО «Томский<br>инструмент»                        | 1340<br>1                                           | 11,4                        |     |                           | 3,02 |                    | 3,9                      | 18,32 | 54                |
| 8 | Томский<br>электротех-<br>нический завод           | 5815                                                | 9,0                         |     |                           | 2,0  |                    | 18,2                     | 29,2  | 4,4               |
| 9 | ОАО «Томский<br>элект-<br>ромеханический<br>завод» | 8384                                                | 8,1                         | ОД  | 0,36                      | 3,9  |                    | 3,2                      | 15,66 |                   |

К сожалению, наша страна по этому показателю значительно уступает развитым странам Запада. Доля энергетической составляющей в себестоимости продукции в России выше в настоящее время в полтора-два и более раз.

Данные о потреблении энергоресурсов некоторыми предприятиями Томской области приведены в таблице 6.1.

После внезапного отпуска цен на энергоносители этот показатель в нашей стране значительно вырос.

Даже при сохранении остальных составляющих себестоимости на прежнем уровне, произведенная в перестроечный период продукция оказалась неконкурентноспособной не только на внешнем, но и на

внутреннем рынке. Как результат - кризис неплатежей, переход на бартерные и зачетные взаимоотношения.

Ситуация осложняется еще и тем, что монопольное положение энергоснабжающих организаций создает иллюзию возможности дальнейшего повышения тарифов, что, в свою очередь, неизбежно вызовет дальнейший рост цен на производимые товары и услуги предприятий-потребителей электроэнергии и тепла. Аргументация необходимости дальнейшего повышения тарифов сводится к упоминанию очевидного факта - в стране еще не достигнут мировой уровень цен на энергоносители. Но это большое заблуждение. Оно не учитывает реальную ситуацию в экономике страны.

Нормальное в условиях рынка желание заработать как можно больше ограничивается платежеспособностью партнера. Хронические неплатежи ведут к нарушению режима устойчивого энергоснабжения потребителя, при этом страдают от так называемых веерных отключений и те, кто регулярно оплачивает услуги энергоснабжающих организаций. В результате - затяжной экономический кризис в стране, нарушение экономических связей между отдельными предприятиями и отраслями промышленности.

Продолжение таблицы 6.1

| 1  | 2                                            | 3     | 4                        | 5 | 6    | 7    |     | 9    | 16    | И    |
|----|----------------------------------------------|-------|--------------------------|---|------|------|-----|------|-------|------|
| 10 | ОАО «Томский завод резиновой обуви»          | 20502 | 4,34                     |   | 5,99 | 0,6  |     |      | 10,93 | 55,4 |
| 11 | ОАО «Самусья ССРЗ»                           | 2580  | 16,5                     |   | 15,2 | 0,3  |     | 1,5  |       | 12   |
| 12 | ОАО «Томский завод измерительной аппаратуры» | 4264  | 16,7                     |   |      | 6,3  | 3,2 |      | 26,2  | 31   |
| 13 | ОАО «Электроцентралит»                       | 8616  | 15,0                     |   |      | 1,0  | 9,0 | 10,0 | 35,0  | 28   |
| 14 | ЗАО «Сибкабеля»                              | 19653 | 4,5                      |   | 0,75 | 2,37 |     | 0,55 | 8,17  | 111  |
| 15 | Томский радиотехнический завод               | 4038  | 19,0                     |   |      | 2,0  |     | 19,0 | 40    |      |
| 16 | ГНПП «НИИПП»                                 | 4907  | 11,08                    |   |      | 1,57 |     | 5,76 | 18,41 |      |
| 17 | ЗАО «Томская карандашная фабрика»            | 913   | 10,8 (+ тепловая энерг.) |   |      | 4,6  |     |      | 15,4  | 11,0 |

В условиях кризиса страдают все, в том числе и производители энергии.

Понимание абсурдности сложившегося положения привело к идее частичного регулирования рыночных отношений со стороны государства, установления баланса интересов производителя и потребителя энергии, проведения разумной тарифной политики.

Все большую значимость при этом приобретает перевод хозяйственного комплекса страны на энергосберегающий путь развития. В стране растет понимание, что альтернативы энергосбережению нет. Мы уже осознали, что никто нас в мировую экономику с таким энергоемким товаром, а следовательно, и стоимостью, не пустит. Поэтому энергосбережение можно с определенными оговорками отнести к экологически чистому, альтернативному и, в определенном смысле, неисчерпаемому "источнику" энергии.

## ЛЕКЦИЯ 7. Основы теории горения углеводородного топлива

### 7.1. Механизм реакции горения топлива

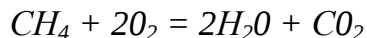
Горение - реакция высокотемпературного окисления топлива, сопровождающаяся выделением энергии (тепла, света). Как известно, химическое взаимодействие углеводородов с кислородом воздуха в промышленности осуществляют в двух режимах.

Если цель окисления углеводородов - получение кислородсодержащих продуктов высокой потребительской ценности (спирты, альдегиды, кетоны, кислоты), то процесс окисления ведут, как правило, при сравнительно низких температурах (не выше 250°C). При этой температуре реакция окисления протекает сравнительно медленно по механизму вырожденного разветвления (через первичное образование гидроперекисей), и для ее ускорения требуется присутствие гомогенных или гетерогенных катализаторов.

В отличие от этого, при использовании углеводородного сырья исключительно в качестве энергетического топлива с целью получения тепла и энергии процесс окисления ведут при температурах выше 1000°C. В этих условиях реакция протекает по обычному механизму цепных разветвленных реакций.

#### Цепная реакция

Рассмотрим механизм реакции горения углеводородов на примере реакции горения метана в кислороде (3.12):



Эта реакция относится к *цепным реакциям*.

Цепными реакциями называют такие, в которых превращение исходных веществ в продукты реакции протекает через регулярное чередование нескольких реакций с участием свободных радикалов.

Любая цепная реакция обязательно включает три основные стадии: зарождение цепи, продолжение цепи и обрыв цепи.

Зарождением (иницированием) цепи называют стадию цепной реакции, в которой из валентно насыщенных молекул образуются свободные радикалы. Реакциями продолжения цепи называют стадии цепной реакции, в которых с сохранением свободной валентности расходуются исходные реагенты и образуются продукты реакции.

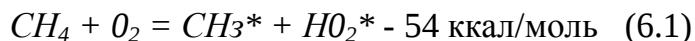
Обрывом цепи называют стадии цепного процесса, в которых происходит исчезновение свободной валентности.

Элементарная стадия цепной реакции, в которой превращение активных промежуточных частиц приводит к увеличению числа свободных радикалов и атомов называется *разветвлением цепи*.

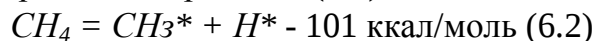
Образование свободных радикалов в результате превращений стабильных продуктов реакции окисления называется *вырожденным разветвлением цепи*.

В самом общем виде схему реакции горения можно представить следующей схемой.

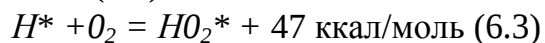
#### Стадия зарождения цепи



Эндотермическая реакция инициирования (6.1) энергетически более выгодна, чем эндотермическая реакция (6.2):

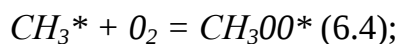


Обусловлено это тем, что одновременно с реакцией (6.2) протекает экзотермическая реакция (6.3):



#### Стадия продолжения цепи

Ключевой стадией продолжения цепи является образование перекисного радикала  $CH_3O_2^*$



Гидропероксидный радикал может распадаться с образованием молекулы формальдегида  $HCHO$  по реакции:



Вода образуется по реакции:



Вырожденное разветвление осуществляется при взаимодействии альдегида с  $O_2$ :

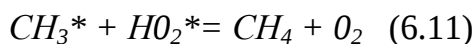


Продолжение цепи окисления происходит также по реакции:



### Стадия обрыва цепи

Наиболее часто обрыв цепи наблюдается в результате гибели радикала  $HO_2^*$  на стенке и по так называемому механизму *квадратичного обрыва* в результате протекания реакции рекомбинации двух радикалов:



Согласно этому механизму активными центрами реакции количественного горения метана в кислороде до  $CO_2$  и  $H_2O$  являются радикалы  $CH_3^*$ ,  $HO^*$ ,  $HO_2^*$ ,  $HCO^*$  и  $CH_3OO^*$ .

В основе процесса горения топлива лежат физико-химические реакции соединения горючих компонентов с окислителем.

Когда химические реакции окисления происходят между веществами, находящимися в одной фазе, их называют гомогенными, а когда в разных - гетерогенными, то есть горение твердого и жидкого топлива в воздухе относится к гетерогенным реакциям, а всех видов газообразного топлива (природного, нефтепромыслового, нефте-заводского и др.) - к гомогенным реакциям.

В процессе горения во фронте пламени концентрация топлива и окислителя резко падает, а концентрация продуктов сгорания и уровень температуры резко возрастает.

В соответствии с работами Н.Н.Семенова по химической кинетике и реакционной способности топлива горение протекает по цепным реакциям с неразветвленными и разветвленными цепями. В процессе цепной реакции возникают свободные атомы, радикалы и другие неустойчивые промежуточные соединения, обладающие повышенной химической активностью. Реагируя с исходным веществом, активные центры могут образовывать не только конечные продукты реакции, но и новые активные промежуточные продукты.

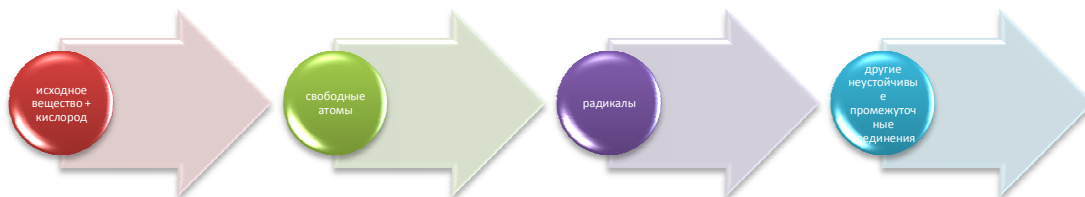


Рис. 7.1. Образование активных центров

Цепная реакция с неразветвленными цепями отличается тем, что в

результате взаимодействия одного активного центра с молекулами исходного вещества образуются молекулы конечного вещества, плюс один новый активный центр. В таких реакциях число активных центров не зависит от хода реакции. Оно может сохраниться постоянным, если будет достигнуто равновесие между процессами зарождения и обрыва цепей. По механизму неразветвленных цепных реакций протекает термический крекинг углеводородов.

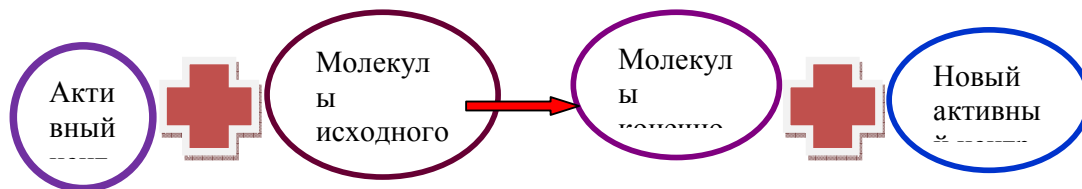
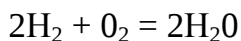


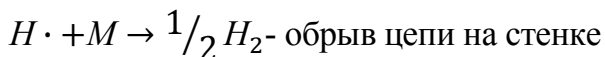
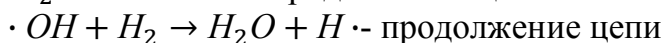
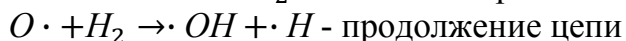
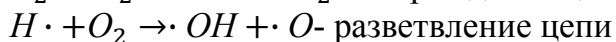
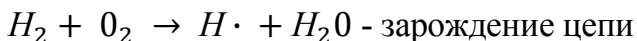
Рис. 7.2. Схема неразветвлённой цепной реакции

В цепных реакциях с разветвляющимися цепями израсходованный в результате химического взаимодействия один активный центр не только восполняется, но при этом зарождается еще один или несколько дополнительных, дающих начало новым цепям. В таких реакциях концентрация активных центров в течение реакции резко возрастает и приводит к ускорению реакции вплоть до завершения ее взрывом.

Примером цепной реакции с разветвляющимися цепями является реакция горения водорода. Стехиометрическое уравнение ее имеет вид:



В действительности эта реакция идет через образование промежуточных активных центров-атомов водорода, кислорода и радикалов по следующей схеме:



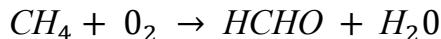
где М - инертная молекула газа или стенки реактора.

Механизм реакции горения углеводородов является наименее изученным. Ряд выполненных исследований позволяет представить лишь предположительную схему этого процесса. Даже схема стадийного горения метана представляет собой довольно сложную совокупность цепных реакций с образованием как стабильных, так и нестабильных промежуточных

продуктов. В литературе рассматривается несколько схем цепного реагирования метана с кислородом, но все они носят предположительный характер. Общим во всех схемах является сочетание цепного механизма окисления метана с отдельными стадиями термического разложения метана.

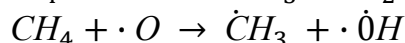
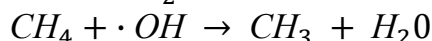
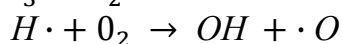
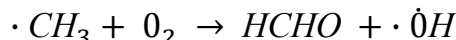
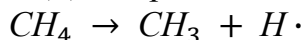
Основные стадии процесса горения метана:

неполное горение метана с образованием формальдегида по реакции

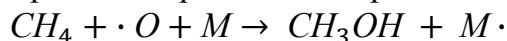


и дожигание формальдегида  $HCHO + O_2 = H_2O + CO_2$

Для первой стадии характерны следующие реакции:



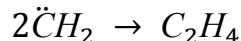
При низких температурах протекают реакции с образованием метанола:



С повышением температуры усиливается глубина термического разложения и метил  $CH_3$  превращается в метилен  $CH_2$ :



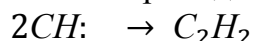
Результатом реакции обрыва цепей является образование этилена:



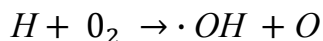
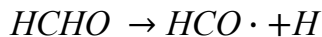
В результате термического разложения метилена  $CH_2$  образуется метин  $CH$ :



Взаимодействие молекул метина приводит к образованию ацетилена:



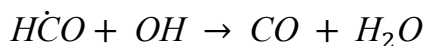
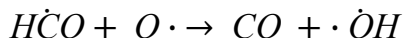
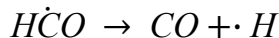
Для горения формальдегида (вторая стадия) характерны следующие реакции:



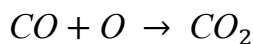
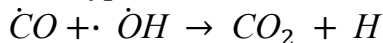
Образовавшийся формальный радикал  $HCO$  может вступать в реакции с кислородом:



и разлагаться с образованием окиси углерода:



Окись углерода сгорает по уравнению



## 7.2. Состав продуктов горения

Из рассмотренного выше механизма горения видны пути расходования исходного метана и кислорода и пути получения конечных продуктов  $CO_2$  и  $H_2O$ .

В условиях неполного сгорания углеводородные топлива частично окисляются до  $CO$ , а не до  $CO_2$  или разлагаются с образованием сажи (высокодисперсных частиц элементарного углерода). Топлива могут содержать и содержат в своем составе различные серосодержащие соединения, которые в условиях протекания реакции горения приводят к получению  $SO_2$ . Следует отметить, что молекулярный кислород в качестве окислителя используют лишь для специальных целей. Как правило, сжигание ведут в воздухе, содержащем около 78% азота. Поэтому в условиях высоких температур горения топлива наблюдается образование оксидов азота.

На рис. 7.3 приведены результаты сжигания в факеле нефтезаводского газа, в основном состоящего из метана и имеющего теплоту сгорания около  $4 \cdot 10^4$  кДж/м<sup>3</sup> в газо-мазутной горелке. Показано распределение концентраций исходного газообразного топлива ( $CH_4$  и  $H_2$ ), кислорода воздуха, продуктов горения метана  $CO_2$ ,  $CO$ , образующихся оксидов азота ( $NO_x$ ) и температуры по длине факела.

Длина факела приведена по оси абсцисс в условных единицах, как отношение длины факела к его диаметру, численно равному диаметру насадки (см. рис. 7.3).

Из рис. 7.3. видно, что факел имеет максимальную температуру в начале 2-ой четверти его длины. Следует отметить, что положение температурного

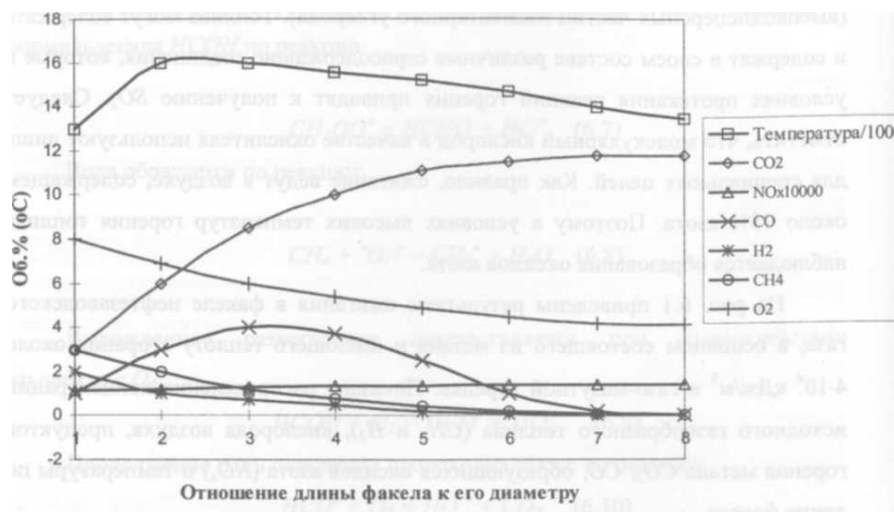


Рис. 7.3 Распределение температуры, концентраций

максимума факела зависит от многих факторов, и определяется, прежде всего, конструкцией горелки, подачей воздуха и видом топлива.

Видно, что в согласии с представлениями о кинетике реакции идет монотонное снижение концентрации компонентов исходного топлива  $CH_4$ ,  $H_2$  и окислителя  $O_2$ . Концентрация промежуточного продукта неполного окисления метана -  $CO$  - проходит через максимум. Концентрация конечного продукта -  $CO_2$  (другой конечный продукт - вода - на графике не показан) нарастает, достигая максимума в конце факела.

Огонь, пламя всегда занимали, занимают и будут занимать значительное место в материальной и духовной жизни человека. Именно добывание и широкое использование огня способствовало быстрой эволюции человека. Одна из основных военных команд в русской, английской, немецкой и французской армиях звучит одинаково: «Огонь!», «Fire!», «Foer!», «Fue!». Люди упоминают огонь в стихах и песнях: знаменитое Б. Пастернака «...Свеча горела на столе, свеча горела...», или «Вьется в тесной печурке огонь...» и т.д.

### 7.3. Концентрационные пределы воспламенения (распространения пламени)

Скорость горения смеси топлива с воздухом с повышением температуры увеличивается, как и скорость любой химической реакции в соответствии со вторым постулатом химической кинетики, известным как

$$k = k_0 \exp(-E/RT) \quad (6.12)$$

закон Аррениуса:

где  $k$  - константа скорости реакции горения,

$k_0$  - предэкспоненциальный множитель константы скорости,

$E$  - энергия активации реакции, кДж/моль

$R$  - универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/Кмоль

$T$  - температура реакции, К.

При температуре ниже определенного значения реакция горения не протекает. Поэтому, как правило, топливно-воздушную смесь, подающуюся на сжигание, подогревают до определенной температуры, которая зависит от вида топлива, соотношения воздух/топливо, от конструкции горелки.

Соотношения воздух/топливо, в которых возможно зажигание и горение топлива ограничены верхним и нижним концентрационными пределами воспламенения, которые определяют область воспламенения вещества.

Под нижним (верхним) концентрационным пределом воспламенения (распространения пламени) понимают минимальное (максимальное) содержание горючего в смеси «горючее вещество окислительная среда», при котором возможно распространение пламени по смеси на любые расстояния от источника.

Концентрационные пределы воспламенения определяются природой и составом топлива. Например, концентрационные пределы воспламенения водород-воздушных смесей имеют интервал от 4 до 74% об. Иначе говоря, водород будет гореть в смеси с воздухом, если его концентрация в водородвоздушной смеси находится в интервале 4-74% об. При концентрациях ниже 4% и выше 74% в смеси с воздухом его горение не происходит.

Концентрационные пределы воспламенения метана и СПБТ (смеси пропан-бутана технических) в горючих углеводородно-воздушных смесях равны (% об.) 5-15 и 1,8-9,5 соответственно.

#### 7.4. Условия полного сгорания пламени

Для обеспечения полного сгорания топлива должны быть созданы определенные условия. Главное, к горючему веществу нужно подвести в необходимом количестве окислитель (обычно воздух). Обязательным условием является качественное смешение топлива с воздухом. Далее состав газовой смеси должен находиться в концентрационных пределах воспламеняемости. Необходимо также создать источник воспламенения и условия для стабилизации фронта воспламенения, то есть определенный температурный уровень. Все эти условия учитываются при разработке конструкций и эксплуатации горелочных устройств.

Воспламенение газовой смеси может быть самопроизвольным и вынужденным. Вынужденное воспламенение или зажигание происходит при внесении в реагирующую смесь источника тепла, температура которого выше ее температуры воспламенения. Под самовоспламенением понимают прогрессирующее самоускорение химических реакций, в результате которого процесс достигает максимальных скоростей и на завершающей стадии протекает мгновенно.

Газовоздушные смеси воспламеняются только в том случае, если содержание газа в воздухе находится в определенных пределах (для каждого газа). При незначительном содержании газа количества теплоты, выделяющейся при его сгорании, недостаточно для доведения граничащих слоев смеси до температуры воспламенения, то есть для поддержания горения. При большом содержании газа в смеси ощущается недостаток кислорода, поступающего на горение, что также не позволяет достичь необходимого температурного уровня для осуществления воспламенения смеси. Этим случаям соответствуют нижний и верхний пределы воспламеняемости газов в воздухе. В табл. 2.1 приведены пределы воспламеняемости для различных газов.

Разбавление горючих газов балластными примесями  $N_2$ ,  $CO_2$  и т.п., ухудшает условия воспламенения. Как видно из табл. 7.1, разбавление чистого кислорода азотом воздуха сужает пределы воспламеняемости. Причем нижний предел почти не изменяется, а верхний предел значительно снижается.

С повышением температуры газовой смеси пределы воспламеняемости расширяются. Изменение давления горючих газовой смеси неоднозначно влияет на пределы воспламенения. Повышение давления выше атмосферного для водорода-воздушной смеси сужает пределы воспламенения, а для метана-воздушной - расширяет.

Пределы воспламенения горючих газовых смесей, не содержащих балластных примесей, определяются по формуле Ле Шателье.

$$l_{см} = \frac{100}{\frac{a_1}{l_1} + \frac{a_2}{l_2} + \frac{a_3}{l_3} + \dots + \frac{a_n}{l_n}},$$

где  $l_{см}$  - верхний или нижний предел воспламенения газовой смеси, %;  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$  - содержание горючих составляющих в смеси, %;  $l_1, l_2, l_3, l_n$  - верхний и нижний предел воспламенения отдельных горючих компонентов, %.

Таблица 7.1. Пределы воспламеняемости газов в воздухе

| Газ            | Предел воспламеняемости   |         |                             |         |
|----------------|---------------------------|---------|-----------------------------|---------|
|                | % газа в смеси с воздухом |         | % газа в смеси с кислородом |         |
|                | Нижний                    | Верхний | Нижний                      | Верхний |
| Природный      | 4,5                       | 17,0    |                             |         |
| Водород        | 4,1                       | 74,2    | 4,0                         | 94      |
| Метан          | 5,3                       | 14,0    | 5,1                         | 61      |
| Этан           | 3,2                       | 12,5    | 3,0                         | 66      |
| Пропан         | 2,4                       | 9,5     | 2,3                         | 55      |
| Бутан          | 1,9                       | 8,4     | 1,8                         | 48      |
| Ацетилен       | 2,5                       | 80,0    | 2,5                         | 98      |
| Оксид углерода | 12,5                      | 74,2    | 15,5                        | 94      |
| Сероводород    | 4,3                       | 45,5    |                             |         |

Для газов, содержащих значительное количество балласта, формула Ле Шателье не дает точных результатов. В этих случаях необходимо пользоваться более сложными расчетами или определять пределы воспламенения опытным путем.

Коэффициент избытка воздуха, соответствующий верхнему или нижнему пределам воспламенения газовой смеси, определяется по формуле

$$\alpha = \frac{100 - I_{\text{см}}}{I_{\text{см}} V^0},$$

где  $V^0$  - теоретическое количество воздуха, необходимое для полного сгорания,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

Окисление газов происходит и при низких температурах, но довольно медленно из-за незначительных скоростей химических реакций. При повышении температуры скорость реакций окисления возрастает до наступления самовоспламенения. Температура воспламенения газа зависит от ряда факторов: от содержания газа в газовой смеси, способа нагрева смеси, давления и других параметров и поэтому не является стабильным параметром.

В табл. 7.2 приведены значения температур воспламенения горючих газов в смеси с воздухом.

Одной из существенных характеристик процесса сгорания газообразного топлива является скорость распространения пламени в газовой смеси ( $U_n$ ). Различают два режима стационарного распространения пламени: в покоящейся или ламинарной среде и в турбулентном потоке. Первый носит название *нормального распространения пламени*, а второй - *турбулентного*.

Нормальное распространение пламени зависит от молекулярных характеристик смеси. В режиме турбулентного распространения перенос тепла связан со свойствами турбулентного потока, то есть существенным образом зависит от гидродинамических характеристик потока.

Для смеси заданного состава нормальная скорость распространения пламени является физико-химической характеристикой и зависит от температуры и давления. Повышение температуры газовой смеси ведет к увеличению скорости распространения пламени, а повышение ее давления несколько снижает  $U$ .

---

Таблица 7.2. Температура воспламенения горючих газов

| Газ            | Температура воспламенения, °С |     |
|----------------|-------------------------------|-----|
|                | от                            | до  |
| Природный      | 560                           | 800 |
| Водород        | 510                           | 590 |
| Метан          | 545                           | 850 |
| Этан           | 510                           | 595 |
| Пропан         | 500                           | 590 |
| Бутан          | 430                           | 570 |
| Ацетилен       | 335                           | 500 |
| Оксид углерода | 610                           | 660 |

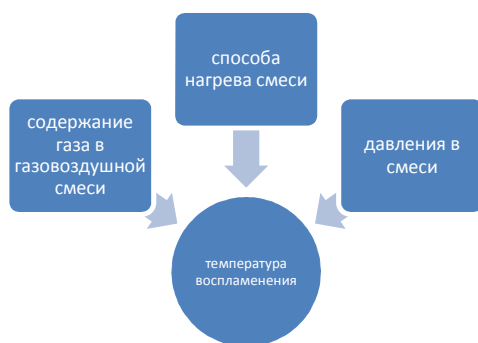


Рис. 7.4. Факторы, определяющие температуру воспламенения

В табл. 7.3. приведены значения нормальных скоростей распространения пламени смесей различных газов с воздухом. Значение  $U_{н \max}$

смесях углеводородных газов с воздухом можно определять по формуле

$$U_{н \max} = \frac{C_1 U_1 + C_2 U_2 + \dots + C_n U_n}{C_1 + C_2 + \dots + C_n}, \quad (5.38)$$

где  $C_1, C_2, \dots, C_n$  — содержание компонентов в газовой смеси, %;  $U_1, U_2, \dots, U_n$  — соответственно максимальное значение нормальной скорости распространения пламени для каждого компонента в смеси с воздухом.

Некоторые различия абсолютных скоростей  $U$  в табл. 5.27. объясняются влиянием внешних факторов и условиями проведения экспериментов.

Как видно из табл. 7.3, метан принадлежит к медленно горящим газам и максимальная скорость горения соответствует содержанию метана в смеси с воздухом около 10%.

Таблица 7.3. Нормальная скорость распространения пламени в смесях горючих газов с воздухом

| Газ               | Стехиометрическая смесь |         |            | Смесь, в которой $U_{н}$ имеет максимальное значение |         |                |
|-------------------|-------------------------|---------|------------|------------------------------------------------------|---------|----------------|
|                   | Содержание,             |         | $U$ , см/с | Содержание, %                                        |         | $U_{н}$ , см/с |
|                   | газа                    | воздуха |            | газа                                                 | воздуха |                |
| 1                 | 2                       | 3       | 4          | 5                                                    | 6       | 7              |
| Водород           | 29,5                    | 70,5    | 160-180    | 42-43                                                | 57-58   | 265-267        |
| Окисьуглерод<br>а | 29,5                    | 70,5    | 28-30      | 43-52                                                | 48-57   | 41-46          |

|          |      |       |           |          |           |           |
|----------|------|-------|-----------|----------|-----------|-----------|
| Метан    | 9,5  | 90,5  | 28-37     | 9,5-10,5 | 89,5-90,5 | 37-38     |
| Пропан   | 4,03 | 95,97 | 40,6-40,8 | 4,26     | 95,74     | 42,9-43,2 |
| Бутан    | 3,14 | 96,86 | 34        | 3,3      | 96,7      | 37        |
| Ацетилен | 7,75 | 92,25 | 100-128   | 10-10,7  | 89,3-90   | 131-157   |

Для поддержания устойчивого сгорания у выхода из газогорелочного устройства необходимо обеспечивать определенное соотношение между скоростями распространения пламени и скоростями поступления этой смеси к месту сгорания. Существенное влияние на устойчивость пламени оказывает соотношение объемов газа и воздуха в смеси: чем больше газа - тем устойчивее пламя. **Проскок пламени** приводит к перегреву и разрушению горелки, к неполному сгоранию топлива. **Отрыв пламени** еще более опасен, так как при погасании факела газ будет заполнять камеру сгорания, газоходы, что может привести к взрыву всего агрегата.

Проскок пламени предотвращают, сужая выходное отверстие для газовой смеси. В этом случае увеличивают скорость выхода смеси, которая не позволяет произойти проскоку.

Отрыва пламени можно избежать, уменьшая скорость газовой смеси на выходе из горелки. Кроме того, применяют различные устройства для надежного поджигания газовой смеси: организуют рециркуляцию горячих продуктов сгорания к основанию газового факела, оборудуют горелку огнеупорным тоннелем, помещают перед факелом керамические рассекатели, устанавливают запальные горелки и т.п.

Немаловажным условием качественного сжигания топлива является своевременное удаление продуктов горения из топочного объема.

При несоблюдении этих условий в продуктах сгорания углеводородных топлив, помимо основных газов -  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  и  $O_2$ , могут содержаться компоненты:  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ , другие углеводороды, сажа, бензпирен. Наличие горючих компонентов обуславливает снижение КПД тепловых агрегатов, а присутствие токсичных веществ - загрязнение воздушного бассейна.

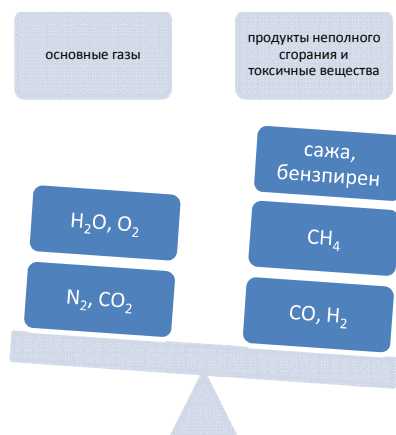


Рис. 7.5. Токсичные вещества в продуктах сгорания

## 7.5. Скорость горения и распространения пламени

Скорость реакции горения имеет существенное значение для обеспечения стационарных условий сжигания топлива.

Рассмотрим более подробно поведение плоского фронта пламени в трубе при различных скоростях подачи топливно-воздушной смеси (рис. 7.6).

Условием обеспечения нормальной работы горелки является равенство скорости горения (скорости распространения пламени) горючей смеси скорости ее подачи. В этом случае зона 2 неподвижна.

Основная количественная характеристика пламени называется *нормальной скоростью горения*. Она представляет собой отношение перемещения фронта пламени в направлении к нормали к поверхности фронта в единицу времени и определяется формулой:

$$U_0 = dx/dt \quad (6.13)$$

где  $x$  - расстояние по нормали от поверхности фронта пламени.

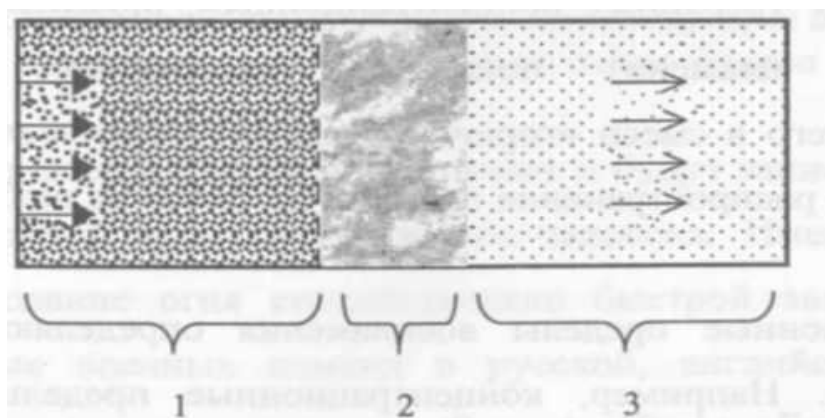


Рис. 7.6. Зональная схема плоского фронта пламени

- 1 - зона горючей топливно-воздушной смеси,
- 2 - зона неподвижного плоского фронта пламени,
- 3 - зона продуктов сгорания топлива.

Основным фактором, определяющим скорость распространения пламени, является химическая реакция, которая служит источником тепловой энергии. Тепловая энергия поддерживает горение и обеспечивает распространение пламени. Величина ее при прочих равных условиях (например, горение проводят в воздухе) определяется природой топлива.

При подаче топливно-воздушной смеси со скоростью меньшей скорости горения, зона пламени 2 смещается в зону подачи горючей смеси 1. Иначе говоря, топливо выгорает быстрее, чем оно подается в зону горения. В этом случае наблюдается явление, называемое *проскок пламени* - т.е. пламя появляется в зоне 1.

Если скорость горения топливно-воздушной смеси меньше скорости ее подачи, то зона горения 2 перемещается в зону выноса продуктов реакции горения 3 и возникает явление известное, как *отрыв пламени* горелки.

В этой связи становится понятным требование, предъявляемое к горелкам и направленное на обеспечение надежного и оптимального регулирования соотношения скоростей подачи топлива и его горения.

Однако в реальных условиях работы промышленных факельных горелок плоский фронт пламени (зона 2) при высоких скоростях горения топлива не стабилен, разрушается на множество локальных сравнительно небольших по размеру зон, в которых и происходит сгорание топлива.

Ниже приведены скорости распространения пламени (скорости горения) некоторых топливно-воздушных смесей (м/с):  $H_2$  - 250,  $CH_4$  - 34,  $C_2H_6$  - 70,  $C_3H_8$  - 70,  $C_2H_2$  - 140, CO - 40.

## 7.6. Классификация и структура пламен

Энергия топлива, высвобождающаяся в ходе протекания экзотермической реакции, часто принимает форму лучистой энергии и сопровождается излучением света - пламенем.

Прежде чем перейти к классификации пламен отметим, что химики давно обратили внимание на окрашивание бесцветного пламени в различные цвета летучими соединениями. В аналитической химии хорошо известна проба Ф.Ф. Бельштейна. При внесении в пламя горелки платиновой проволоки с соединениями натрия, калия и меди оно окрашивается в желтый, фиолетовый и зеленый цвета соответственно.

Называя пламенем любое свечение, источником которого является химическая реакция, можно привести следующую классификацию пламен по типам.

К I типу относят пламена, горящие без предварительного перемешивания топлива и воздуха, называемые *диффузионными*. В них перемешивание газообразного топлива и воздуха (окислителя) происходит в результате молекулярной диффузии. В свою очередь диффузионные пламена делят на *холодные* и *горячие*.

К числу *холодных* (400-500K) относят пламена, горящие при высоком разряжении (в вакууме). Их еще называют разряженные пламена. В таких условиях скорость реакции горения невелика, температура пламени относительно невысока. Поскольку все выделяющееся в зоне горения тепло отводится через стенки горелки, то температура пламени примерно равна температуре стенок горелки (сосуда). Примером *холодного диффузионного пламени* является реакция горения сероуглерода:



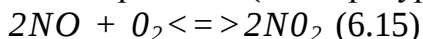
Примером *горячего диффузионного пламени* является пламя  $CH_4$  или  $CO$ . Например, так горит природный газ в бытовой газовой плите.

К типу II принадлежат пламена, горящие в заранее приготовленной топливно-воздушной смеси при любом давлении. Практически важное значение в теплоэнергетике имеют горячие пламена разнообразных топливно-воздушных смесей, горящих как при атмосферном, так и давлении выше атмосферного. Температура такого пламени обычно составляет 2000-3000K.

### 7.7. Механизм образования загрязняющих веществ при сжигании углеводородного топлива

Из рис. 6.1 видно, что кроме  $CO_2$  и  $H_2O$  в состав продуктов сгорания  $CH_4$  входит -  $NO_x$ . Естественно возникает вопрос о происхождении оксидов азота. Рассмотрим механизм образования  $NO_x$

Содержащиеся в продуктах сгорания оксиды азота, принятое обозначение которых  $NO_x$ , представляют собой в основном смесь двух оксидов  $NO_2$  и  $NO$ . Концентрация этих оксидов определяется условиями протекания реакции (температура, концентрация  $O_2$ ).



По происхождению  $NO_x$  подразделяются на топливные и термические.

#### 7.7.1. Термические $NO_x$

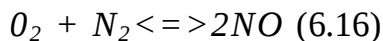
Основным путем получения  $NO_x$  является окисление азота воздуха при горении топлива. Это было установлено в работах Я.Б. Зельдовича и Д.А. Франк-Каменецкого. Остановимся кратко на основных результатах этих исследований.

1. Было установлено образование  $NO$  после окончания горения топлива, в той зоне, где нет горючего и следовательно нет реакции горения, что прямо доказывают термическую природу реакции получения оксидов азота.

2. Количество образующегося  $NO$  не зависит от количества и типа горючего, но определяется концентрацией кислорода и азота.

3. Подогрев исходной горючей смеси повышает содержание  $NO$  в продуктах горения.

Таким образом,  $NO$  образуется в результате протекания обратимой реакции:

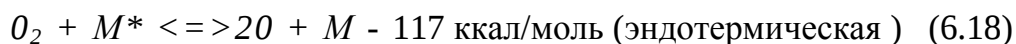


Уравнение скорости реакции имеет

$$W = k [N_2] [O_2]^{0,5} \quad (6.17)$$

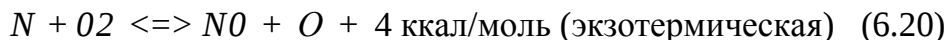
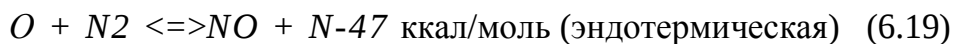
Механизм реакции - цепной и включает следующие основные стадии.

♦ Стадия зарождение цепи:

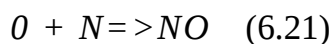


где  $M^*$  - частица (молекула) с избыточной энергией.

♦ Стадии продолжения цепи:



♦ Стадия обрыва цепи:



### 7.7.2. Топливные NOx

Если углеводородное топливо содержит N-содержащие соединения, то при их сгорании образуются так называемые *топливные NOx*.

Органические азотсодержащие соединения содержатся в российских нефтях в количестве до 0,6 масс.% и отсутствуют в природном газе и газовом конденсате. Поэтому источником топливных NOx являются углеводородные топлива, полученные из нефти. Содержание азота в топливах повышается с увеличением их температуры кипения. С позиций теплотехники наибольший интерес, как энергетические топлива, представляют мазут и другие котельные топлива. Основное количество азота в мазутах приходится на следующие соединения: пиррол, пиридин, пиперидин, пиколины, хинолин, индол, карбазол (рис.7.7).

Таким образом, видно, что азот в нефтяных топливах представлен гетероциклическими вторичными (группа  $HN<$ ) и третичными аминами (группа  $N\leq$ ).

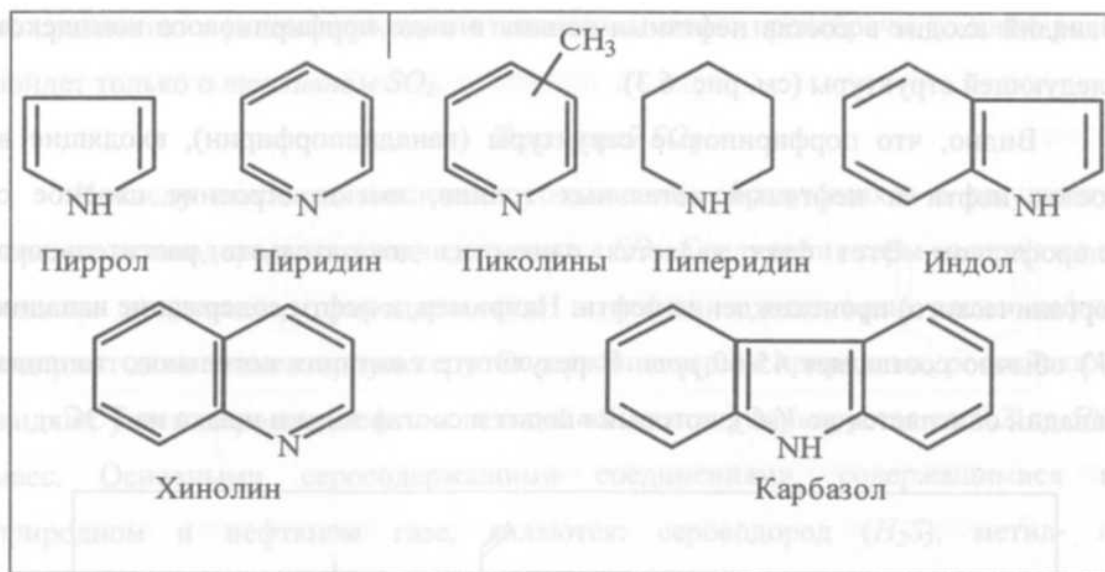
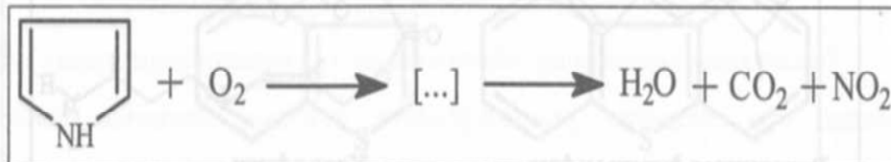


Рис. 7.7. Структура азотсодержащих соединений мазута

Следует отметить, что топливный азот окисляется до NO существенно быстрее термического азота. Механизм образования NO при горении органических азотсодержащих соединений достаточно сложен и поэтому ограничимся следующей общей схемой:



где [...] - интермедиа™ (промежуточные соединения).

Топливные оксиды азота образуются при температуре около 600K. Причем выход оксида азота обычно не превышает 50% в расчете на топливный азот. Принимая во внимание практически полное сгорание нефтяного топлива, можно предположить что, часть оксидов азота восстанавливается продуктами горения до  $\text{N}_2$ .

Котельные топлива (мазут и другие) содержат в своем составе металлы, прежде всего ванадий (V), количество которого составляет 0,02 - 0,05%. Ванадий входит в состав нефтяных топлив в виде порфиринового комплекса следующей структуры (см. рис. 7.8).

Видно, что порфириновые структуры (ванадилпорфирин), входящие в состав нефти и нефтяных котельных топлив, имеют строение сходное с хлорофиллом. Этот факт является одним из доказательств растительного (органического) происхождения нефти. Например, в нефти содержание

ванадия (*K*) обычно составляет 45-60 *ppm*. В результате сжигания котельного топлива ванадий окисляется до  $V_2O_5$ , который входит в состав золы и шлака на ТЭС.

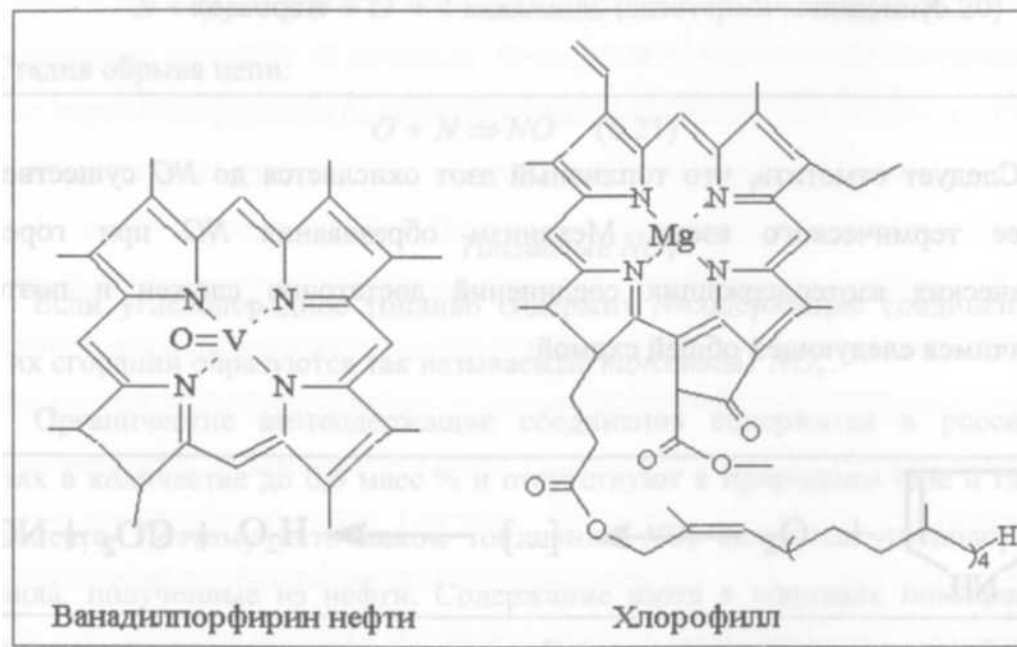


Рис. 7.8. Структура порфиринового комплекса нефти

### 7.7.3. $SO_2$

Если углеводородное топливо содержит S-содержащие соединения, то при их сгорании, в основном, образуется  $SO_2$  и в существенно меньшей степени  $SO_3$  и S. Присутствие в продуктах сгорания природного газа некоторого количества  $H_2S$  обусловлено неполнотой сгорания газообразного топлива.

Поскольку концентрацией S-содержащих соединений в атмосферном воздухе по сравнению с углеводородными топливами можно пренебречь, то ниже речь пойдет только о *топливном*  $SO_2$ .

### 7.7.4. Топливный $SO_2$

К числу наиболее токсичных соединений, образующихся в результате горения углеводородных топлив, относится  $SO_2$ . Соединения серы содержатся в газовом конденсате, природном газе и нефти, а некоторые виды нефти содержат даже элементарную серу. Содержание серы в природных, российских, жидких углеводородах (нефть и газовый конденсат) варьируется от 0,2 до 5% масс. Основными серосодержащими соединениями, содержащимися в природном и нефтяном газе, являются:

сероводород ( $H_2S$ ), метил- и этилмеркаптаны ( $MeSH$ ,  $EtSH$ ), сероокись углерода ( $COS$ ).

Основные серосодержащие органические соединения в жидких природных углеводородах присутствуют в виде: меркаптанов ( $RSH$ ), сульфидов ( $RSR$ ), дисульфидов ( $RSSR$ ), в которых  $R = Alk$ ,  $Cycloalk$ , а также тиофена, бензотиофена, дибензотиофена (рис. 7.9).

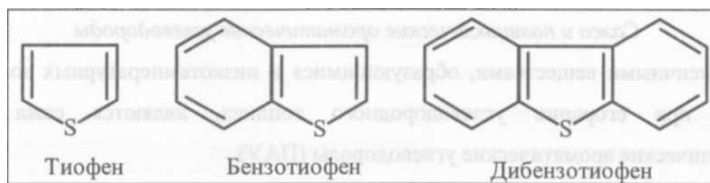
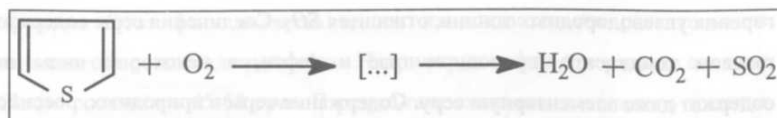


Рис. 7.9. Структура серосодержащих органических соединений в жидких природных углеводородах

Распределение серы по нефтяным и газоконденсатным топливам зависит от природы и типа S-органического соединения. Как правило, содержание S возрастает с утяжелением фракционного состава топлива и достигает своего максимального значения у мазута и других сортов котельных топлив. Следует отметить, что для снижения содержания S в светлых нефтепродуктах (бензин, керосин и дизельное топливо) применяют специальные технологические процессы гидроочистки и гидрокрекинга.

Механизм образования  $SO_2$  при горении органических S-содержащих соединений достаточно сложен и поэтому ограничимся следующей общей схемой:



где [...] - интермедиа™ (промежуточные соединения).

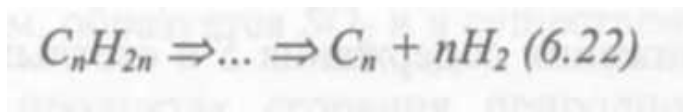
В котельных нефтяных топливах также присутствуют следующие кислородсодержащие органические соединения: нафтеновые кислоты, фенолы, асфальто-смолистые вещества и некоторые другие. Основными продуктами сгорания O - содержащих соединений являются  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2O$ , сажа. Видно, что продукты их сгорания по составу качественно близки составу продуктов сжигания углеводородов.

#### 7.7.5. Сажа и полициклические ароматические углеводороды

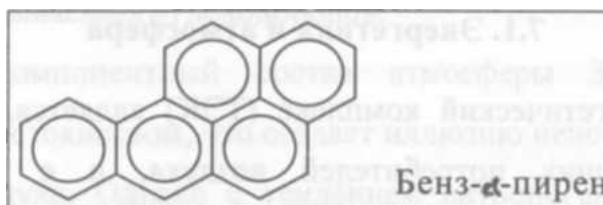
Токсичными веществами, образующимися в низкотемпературных зонах горелок при сгорании углеводородного топлива, являются сажа и полициклические ароматические углеводороды (ПАУ).

*Сажа* - твердый высокодисперсный продукт черного цвета. Примерный состав сажи (% масс): *С* - (90-99); *Н* - (0,3-0,8); *О* - (0,1-10); 5 (0,1-1,5) и зола (0,05-0,5). Средний размер частиц сажи зависит от условий и способа ее сжигания топлива и находится в интервале 10-350 мкм. Схема образования

сажи:



*ПАУ* - это высокомолекулярные углеводороды, образованные сконденсированными бензольными кольцами. Одним из самых токсичных и канцерогенных является бенз-а- пирен, который получается при сжигании всех видов углеводородного топлива и имеет следующую структурную формулу:



## 7.8. Условия образования сажи, бензпирена при сжигании углеводородного топлива

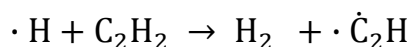
Механизм образования сажи при сжигании углеводородных топлив включает дегидрогенизацию органических соединений и их полимеризацию, ведущую к получению больших углеродных частиц.

Наличие частиц углерода в пламени обусловлено термическим и термоокислительным разложением углеводородов, происходящим, в основном, в первоначальной зоне подогрева и воспламенения нагретой смеси. Имеются различия в образовании сажи в диффузионных пламенах и пламенах с частичным или полным предварительным смешением топлива с воздухом.

Многочисленные исследования, выполненные отечественными и зарубежными исследователями, позволили сделать вывод, что относительная легкость отщепления атомов водорода от углеводородной молекулы по сравнению с разрушением углеродных связей является определяющим фактором сажеобразования.

Начальный процесс сажеобразования включает два процесса: термическая дегидрогенизация происходит сразу же, как только топливо попадает в диффузионное пламя (или его отдельные вихри) и нагревается до 800°C или более высокой температуры, прежде чем приходит в соприкосновение с кислородом воздуха. Второй процесс – образующиеся при разложении и в результате цепных реакций с разветвляющимися цепями

активные частицы ускоряют дегидрогенизацию:



Данная реакция отщепления атома водорода от молекулы ацетилена другим свободным атомом водорода имеет энергию активации всего 20,9 КДж/моль, что указывает на легкость ее протекания. Установлено также, что помимо атомов водорода и другие атомы и радикалы участвуют в процессе сажеобразования.

Таким образом, можно считать, что отделение атомов водорода от молекул углеводородного топлива как за счет термических процессов, так и активными атомами и радикалами является начальным процессом сажеобразования.

Схема процессов образования сажистого углерода для пламен с предварительным смешением топлива с воздухом аналогична схеме для диффузионного пламени. Однако в этом случае время пребывания молекул горючего вещества в зоне предварительного нагрева слишком мало, чтобы могло произойти образование очень больших молекул и их последующая графитизация. Здесь, в зоне высоких температур, скорее может происходить термоокислительный пиролиз, чем образование больших молекул сажистого углерода.

На процессы сажеобразования существенно влияют режимные и конструктивные параметры топочного процесса. Температура пламени оказывает двойное действие на образование сажи - более высокие локальные температуры пламени способствуют образованию частиц сажи, однако при этом ускоряется горение самих частиц.

Подогрев воздуха или газа при сжигании гомогенных смесей приводит к повышению температуры горения, что снижает образование сажи, поскольку температура сильнее влияет на завершение процесса горения, чем на процесс сажеобразования. Однако в очень «богатых» смесях завершение окисления имеет меньшее значение и повышенная температура ускоряет реакции пиролиза и соответственно выход сажи.

Турбулентность потока топлива и воздуха в большинстве случаев ведет к более быстрому сгоранию частиц углерода за счет их лучшего перемешивания с раскаленными газами и кислородом. Увеличение степени предварительного перемешивания топлива с воздухом и повышение качества смешения струй топлива с воздухом позволяет уменьшить образование сажи и создать условия для ее более полного выгорания.

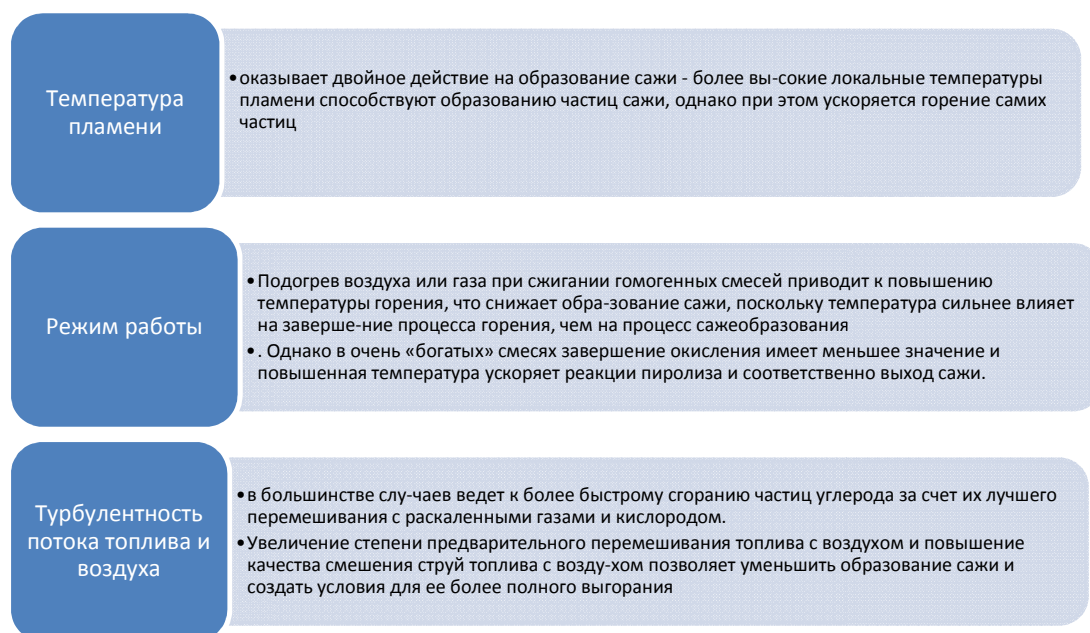


Рис. 7.10. Влияние режимных и конструктивных параметров топочного процесса на образование сажи

Сажистые частицы, образующиеся при горении топлива, можно рассматривать как индикаторы наличия 3,4-бензпирена ( $C_{20}H_{12}$ ), аэрозоли которого легко адсорбируются сажистыми частицами.

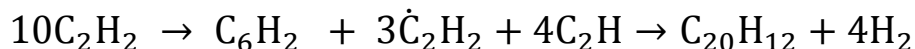
3,4-бензпирен является наиболее распространенным канцерогенным веществом, представляющим собой желтые иглообразные кристаллы. Его молекулярная масса 252, температура плавления 452 К, температура кипения 773 К. Как и все ароматические углеводороды, он практически нерастворим в воде, но растворяется в маслах, жирах, в органических растворителях. Бензпирен образуется из углеводородных соединений с оптимальными температурами около 970-1070 К.

Образуется несколькими путями. Простые углеводороды ( $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ) претерпевают процесс удлинения цепи, приводящей к образованию промежуточных соединений типа  $C_6 - C_4$ , а два таких промежуточных соединения могут образовывать в результате циклизации и дегидрования при высокой температуре  $C_{20}H_{12}$ .

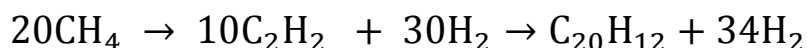
Аналогичным образом длинноцепочные углеводороды, например из нефти, могут распадаться на меньшие фрагменты, претерпевать циклизацию с образованием  $C_6 - C_4$ , а затем таким же путем превращаться в бензпирен.

При высоких температурах процессы пиролиза приводят не только к разложению молекулы вещества, но и к синтезу новых соединений с образованием сажистых образований и сложных

радикалов и соединений типа  $C_6H_2$ . Это соединение в процессе дальнейшего реагирования превращается в зародыш новой фазы, образуя простейшие ароматические углеводороды. Рост зародыша происходит за счет присоединения углеводородных частиц  $C_2H_2$  и  $C_2H$ . Суммарное уравнение образования 3,4-бензпирена из ацетилена можно записать так:



При пиролизе метана балансовое уравнение имеет вид:



### В результате удлинения цепи

- Простые углеводороды ( $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ) претерпевают процесс удлинения цепи, приводящей к образованию промежуточных соединений типа  $C_6 - C_4$ , а два таких промежуточных соединения могут образовывать в результате циклизации и дегидрования при высокой температуре  $C_{20}H_{12}$

### Распадение на фрагменты

- длинноцепочные углеводороды, например из нефти, могут распадаться на меньшие фрагменты, претерпевать циклизацию с образованием  $C_6 - C_4$ , а затем таким же путем превращаться в бензпирен

### Синтез при пиролизе

В условиях недостатка кислорода при температурах 1070 - 1270 К в процессе горения углеводородов образуется значительное количество бензпирена.

Исследования по определению бензпирена в уходящих газах энергетических установок показали, что при работе на природном газе количество 3,4-бензпирена может колебаться в широких пределах (от 0 до 10 мкг) в зависимости от режима работы, условий горения и конструкции горелок.

В присутствии бензпирена оксид углерода, сернистый ангидрид и другие компоненты, не являющиеся канцерогенными, приобретают канцерогенные свойства, т.е. становятся коканцерогенными.

Наряду с бензпиреном в продуктах сгорания топлив могут присутствовать и другие полициклические ароматические углеводороды

(ПАУ), обладающие канцерогенными свойствами. Это 7,12-диметилбензантрацен, дибензантрацен, 1,2,4,5-дибензпирен и др. по концентрациям сопоставимые с бензпиреном. Наличие 3,4-бензпирена в продуктах сгорания рассматривается как основной показатель присутствия и других канцерогенных углеводородных соединений и условий, допускающих синтез канцерогенных веществ ароматического ряда. Поэтому при изучении канцерогенной загрязненности атмосферного воздуха обычно ограничиваются только его обнаружением.

## Литература

1. Ола Дж. Метанол и энергетика будущего; Когда закончатся нефть и газ: пер. с англ./ Дж. Ола, А. Гепперт, С. Практаш. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 416 с.: ил.
2. Мазур И.И. Нефть и газ. Мировая история / И.И. Мазур. – М. : Земля и человек XXI века, 2004. – 896 с. : ил. – Библиогр.: с. 880-888.
3. Глебова Е.В., Глебов Л.С., Сажина Н.Н. Основы ресурсо-энергосберегающих технологий углеводородного сырья. Изд. 2-е, исправленное и дополненное – М.: ФГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2005. – 184 с.
4. Литвак В.В. Основы регионального энергосбережения (научно-технические и производственные аспекты). – Томск: Изд-во НТЛ, 2002. – 300 с.
5. Дульзон Н.А., Закиров Р.И., Литвак В.В. Местоположение источника питания в распределительных сетях // Электрические сети и системы. – Львов: Изд-во Львов. Ун-та, 1971. – Вып. 9. – с. 37-43.
6. Энергетическая стратегия России. Региональная энергетическая политика // Промышленная энергетика. – 1996. – № 2.
7. Степанов В.С., Степанова Т.Б. Потенциал и резервы энергосбережения в промышленности. – Новосибирск: Наука, 1990. – 248 с.
8. Доброхотов В.И. Энергосбережение – важнейшее направление новой энергетической политики России // Теплоэнергетика. – 1993. – № 4.
9. Медоуз Д.Х., Медоуз Д.Л., Рандерс И. За пределами роста / Пер. с англ. Под ред. Г.А. Ягодина. – М.: Прогресс, Пангея, 1994. – 304 с.
10. Литвак В.В. Энергетический баланс как основа формирования потенциала энергосбережения // Тез. Докл. Всерос. Совещ. «Энергосбережение и энергетическая безопасность регионов России». – Томск, 2001. – С. 76–77.
11. Савенко Ю.Н., Штейнгауз Е.О. Энергетический баланс (некоторые вопросы теории и практики) / Под ред. А.М. Некрасова. – М.: Энергия, 1971. – 184 с.
12. Социально-экономическое положение Томской области. Статистический бюллетень. 1999, 2000, 2001 гг. – Томск.
13. Алексеева Т.И., Литвак В.В., Яворский М.И. Стимулирование энергосбережения // Промышленная энергетика. – 2001. – № 12. – С. 2-4.
14. Асвадуров С.В. Задачи энергосберегающей политики в СССР. – Москва: ВНИИФ, Центр, 1987.
15. Газовые топлива и их компоненты. Свойства, получение,

применение, экология : справочник / В.Н. Бакулин [и др.] – М.: Изд-во МЭИ, 2009. – 615 с.

16. Введение в энергосбережение: учебное пособие А.И. Гаврилин, С.А. Косяков, В.В. Литвак и др. ; Томский политехнический университет. – Томск: Курсив плюс, 2000. – 217 с.