

# **ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УГЛЕЙ И ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ**

*Методические указания к самостоятельной работе  
для студентов бакалавриата направления 18.03.01*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2021**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра химических технологий и переработки энергоносителей

## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УГЛЕЙ И ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ

*Методические указания к самостоятельной работе  
для студентов бакалавриата направления 18.03.01*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2021

УДК 66.011, 669 (073)

**ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УГЛЕЙ И ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ:**  
Методические указания к самостоятельной работе / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *М.Ю. Назаренко, С.Н. Салтыкова*. СПб, 2021. 46 с.

Приведены теоретический материал по основным разделам дисциплины и перечень ключевых вопросов для самостоятельной работы студентов.

Предназначены для студентов бакалавриата направления 18.03.01 «Химическая технология» по профилю «Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов».

Научный редактор проф. *Н.К Кондрашева*

Рецензент проф. *Б.А. Дмитриевский* (НПО «Минерал»)

## ВВЕДЕНИЕ

Методические указания по курсу «химическая технология углей и горючих сланцев» предназначены для выполнения самостоятельных работ студентов бакалавриата по направлению подготовки 18.03.01 «Химическая технология» по профилю «Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов».

Цель дисциплины:

- знакомство с основами технологии по переработке углей и горючих сланцев;
- изучение теории процессов, проходящих при переработке углей и горючих сланцев;
- приобретение необходимых знаний для решения вопросов, связанных с переработкой твердых природных энергоносителей;

Основные задачи дисциплины:

- овладение методами исследования физико-химических и теплофизических свойств материалов и расчета энергетических характеристик материала;
- формирование навыков: по определению состава и свойств веществ и материалов; по проведению экспериментов по заданной методике; по составлению отчетов по выполненному заданию; по оценке влияния промышленного производства на состояние окружающей среды; по расчету основных реакций и процессов, происходящих при переработке природных энергоносителей.

В данных методических указаниях для дисциплины «Химическая технология углей и горючих сланцев» рассматриваются такие темы, как изучение свойств твердого топлива; химический состав твердого топлива; рациональный состав углей и горючих сланцев; процессы предварительной подготовки углей и горючих сланцев к термической переработке; основные загрязняющие вещества, образующие при термической переработке углей; термическая переработка углей и горючих сланцев; полукоксование, коксование; газификация углей: агрегаты и параметры процесса; получение искусственных газов.

## САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА №1

### УГОЛЬ И ГОРЮЧИЕ СЛАНЦЫ: ОСНОВНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ, СВОЙСТВА И СОСТАВ

Органическое ископаемое топливо (твердое, жидкое, газообразное) является в настоящее время и по прогнозам до 2030 г. основным источником энергии (теплоты) для промышленного использования, а также для транспортных двигателей. Под *топливом* понимают вещества, выделяющие в результате тех или иных преобразований тепловую энергию, которая используется в технических целях. По принципу выделения энергии различают две группы топлив: **химическое**, выделяющее энергию в результате окисления горючих элементов, и **ядерное**, выделяющее энергию при делении ядер. В настоящее время в мире преимущественно используется химическое или органическое топливо, являющееся источником около 70 % всей вырабатываемой энергии. При использовании топлив находят применение как выделяемая энергия – теплота, так и их химические свойства. Поэтому топлива могут быть разделены на **энергетические** и **технологические**.

**Энергетическое топливо** предназначено для сжигания с целью непосредственного получения тепловой энергии или ее преобразования в механическую и (или) электрическую энергии. **Технологическое топливо** используется для ведения высокотемпературных технологических процессов (нагрев, обжиг, плавление и др.) и химической переработки для получения искусственного топлива (кокса) и технических продуктов (например, при сжигании кокса в доменных печах используются восстановительные свойства углерода).

По агрегатному состоянию все топлива делятся на **твердые**, **жидкие** и **газообразные**, а по способу получения или добычи – на **природные** и **производные (искусственные)**. Кроме древесины, все виды природных топлив представляют собой горючие ископаемые. Искусственное топливо получают путем переработки природного.

**Древесное топливо.** К нему относят дрова, отходы деревообрабатывающих производств: опилки, стружка, щепа и др.; отходы сельского хозяйства: солома, подсолнечная лузга, льняная костра и многие другие. Древесное топливо считают топливом

местного значения. Элементарный состав древесины в среднем отвечает химической формуле клетчатки  $(C_6H_{10}O_5)_x$ , т.е. состоит из 51 % – С, 6 % – Н, 0,7 % – N и 42,3 % – О. Древесина является веществом, из которого образовались другие виды естественного твердого топлива при ее разложении в недрах земли без доступа воздуха в условиях высокой влажности. Разлагаясь, древесина постепенно беднела кислородом и обогащалась углеродом.

**Торф** относится к местным видам топлива. Он является продуктом разложения растительности во влажных условиях без доступа воздуха. По своему составу и многим техническим свойствам торф мало отличается от древесины: так в его горючей массе содержится немного больше углерода и меньше кислорода, что объясняется большей степенью его разложения – обуглероживания. Торф также почти не содержит серы, имеет высокую влажность и небольшую теплоту сгорания. Низшая рабочая удельная теплота сгорания фрезерного торфа с влажностью (45÷55) % составляет 8,5 МДж/кг. Зольность торфа ввиду засорения массы механическими примесями болотных вод выше зольности дров и составляет (5÷15) %. Содержание летучих веществ в торфе меньше, чем в древесине вследствие большей степени разложения растительного вещества.

**Бурые угли** относят к самым молодым углям. Их цвет меняется от бурого до черного, они лишены блеска, имеют пористую структуру, небольшую механическую прочность. Бурые угли содержат (40÷50) % летучих горючих веществ, горят длинным пламенем. Ввиду пористой структуры имеют большую влажность и зольность, обуславливающие их высокий балласт, достигающий 50 % и выше. Марки бурых углей обозначают буквой Б и в зависимости от влажности бурые угли делят на группы: Б1 – с влажностью свыше 40 %, Б2 – с влажностью от 30 % до 40 % и Б3 – с влажностью менее 30 %. Бурые угли некоторых месторождений имеют повышенное содержание серы, достигающее 8 %. В зависимости от содержания балласта удельная теплота сгорания бурых углей колеблется от 9,0 МДж/кг до 18,5 МДж/кг. Бурые угли относятся к местным видам топлива, так как содержат много балласта, не выдерживают дальних перевозок и длительного хранения.

**Каменные угли** – угли с выходом летучих веществ более 9 %, с большей низшей теплотой сгорания рабочего топлива (23,0÷28,0) МДж/кг. Большинство каменных углей относится к спекающимся углям. Содержание балласта в каменных углях относительно невелико – до 20 %. Каменные угли бывают следующих марок в зависимости от выхода летучих веществ (%) на горючую массу, спекаемости и характера нелетучего остатка: длиннопламенный (Д) – 37; газовый (Г) – 37; газовый жирный (ГЖ) – (31÷37); жирный (Ж) – 33; коксовый жирный (КЖ). – (25÷31); отощенный спекающийся (ОС) – 17; тощий (Т) – (25÷37); слабоспекшийся (С) – (17÷36).

К **антрацитам** относят ископаемые угли с выходом летучих веществ до 9 %. Различают полуантрациты (ПА), переходные от тощих каменных углей к антрацитам, и антрациты (А). Низшая теплота сгорания рабочего топлива составляет (21÷27) МДж/кг. Для них характерны металлический блеск, слоистая структура, большая твердость.

**Горючие сланцы** образовались в виде слоистых отложений на дне бывших водоемов в течение длительного времени. Для горючих сланцев характерны высокая зольность, достигающая 65 % на сухую массу, повышенная сернистость и высокое содержание летучих веществ – до 90 % на горючую массу. Низшая удельная теплота сгорания рабочей массы их невысока, всего (6,0÷10,0) МДж/кг.

Топливо состоит из **горючей** и **негорючей** частей. В горючую часть твердого и жидкого топлива входят углерод С, водород Н и сера S, а также условно кислород О и азот N; в негорючую часть – зола А, представляющая смесь минеральных веществ, и влага W, составляющие его балласт В. Они попадают в топливо из недр земли, а также при транспортировке и хранении топлива на складах.

Минеральные примеси уменьшают содержание горючих веществ в единице массы топлива и снижают удельную теплоту его сгорания. Основными минеральными примесями твёрдых топлив являются: кремнезём SiO<sub>2</sub> (до 50 %); глинозём Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (до 25 %); оксиды Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, CaO, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> (до 25 %); сульфиды (преимущественно FeS<sub>2</sub>); карбонаты CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub>, FeCO<sub>3</sub>;

сульфаты  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ; фосфаты, хлориды, соли щелочных металлов. Помимо перечисленных основных компонентов, в минеральных примесях твердого топлива могут присутствовать соединения многих редких элементов: германия, кобальта, никеля, палладия, платины, урана и др.

Содержание химических элементов и других составляющих топлива исчисляется в процентах от единицы массы или объема, исходя из определенной части (массы) топлива. В зависимости от состава и вида топлива различают рабочую, аналитическую, сухую, горючую и органическую массы топлива. Каждой массе присваивается соответствующий индекс: рабочей –  $p$ , сухой –  $c$ , горючей –  $z$ , органической –  $o$ , аналитической –  $a$ .

Для твердых топлив применимы все пять масс. О составе топлива на соответствующую массу судят по индексу элементов. Топливо в том виде, в котором оно приходит к потребителю, называется **рабочим**. На лабораторный анализ топливо поступает воздушно-сухим, т.е. высушенным до постоянного веса на воздухе в естественных условиях. Масса такого топлива называется **аналитической**. При полном высушивании топлива (при  $t \geq 105^\circ\text{C}$ ) получают **сухую** массу. Под **горючей массой** топлива понимают топливо, не содержащее механических компонентов и влаги (балласта). **Органическая масса** топлива в отличие от горючей не содержит колчеданную серу.

Несгоревшая часть топлива образует очаговые остатки, которые, в зависимости от условий сжигания и от местонахождения в разных частях топки и газоходах, могут принимать форму шлака или золы

**Зола** – это твёрдый негорючий порошкообразный остаток, получившийся после завершения преобразований в минеральной части топлива в процессе его горения. Различают летучую золу – пылевидные фракции, уносимые уходящими газами, и провал – более крупные фракции золы, покидающие зону горения через холодную воронку. **Шлак** – это минеральная масса, подвергшаяся высокотемпературному нагреву, в результате которого она приобрела значительную прочность за счёт оплавления и спекания. Зольность, как техническая характеристика, представляет собой массу золы, отнесённую, как правило, к сухой массе топлива и



выраженную в процентах  $A^d$ .

Минеральные примеси, в зависимости от их происхождения, подразделяются на **первичные, вторичные и третичные**. Состав и содержание первичных примесей, внесённых в топливо с исходным органическим углеобразующим материалом, и вторичных, которые попадают в топливо в процессе углеобразования, для каждого конкретного месторождения довольно стабильны. Они равномерно распределены в топливе, и их механическое отделение практически неосуществимо.

Третичные (внешние) минеральные примеси попадают в топливо в процессе разработки месторождения, добычи топлива, его транспортировки и хранения (пустая порода, земля, песок). Третичные примеси обычно неравномерно распределены в топливе и могут сравнительно легко отделяться от топлива (например, в процессе его обогащения).

При сжигании топлива многие компоненты его минеральных примесей подвергаются химическим преобразованиям, в результате которых масса и состав образующейся золы всегда отличаются от массы и состава исходных минеральных примесей топлива. При рассмотрении реакций, происходящих в процессе преобразования минеральных примесей топлива, можно сделать следующие общие выводы:

1. В процессе горения химический состав минеральной части топлива значительно изменяется, поэтому масса и состав золы никогда не равны массе и составу минеральных веществ;

2. Среди реакций, протекающих в минеральной массе при озолении углей, преобладают реакции разложения, поэтому зольность угля почти всегда получается несколько меньше, чем содержание минеральной массы;

3. Каждая из приведенных реакций протекает на определенных стадиях озоления угля и в определенном интервале температур. В соответствии с этим масса и состав золы, полученной при озолении одного и того же угля при разных температурах (например, 800 °C и 1500 °C), будут значительно различаться.

**Теплотой сгорания топлива** называется количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании 1 кг твердого (или жидкого) топлива или 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива при нормальных

условиях. Ее можно определять экспериментально и теоретически, если известен элементарный состав топлива.

Экспериментально теплоту сгорания топлива находят в калориметрической установке. Точно взвешенную навеску испытуемого топлива сжигают в среде сжатого кислорода в калориметрической бомбе и определяют количество выделившейся теплоты. Однако условия сжигания топлива в калориметрической бомбе в значительной степени отличаются от реальных условий их использования в двигателях внутреннего сгорания, парогенераторах, печах и пр.

При сгорании топлив в калориметрической бомбе образуются газообразные продукты, в состав которых входят водяные пары, образующиеся в результате окисления водорода топлива и испарения содержащейся в нем влаги. Температура продуктов сгорания в бомбе близка к температуре окружающей среды, т.е. значительно ниже значения температуры точки росы, поэтому происходит конденсация водяных паров и, следовательно, выделяется соответствующее количество теплоты, при учете которой из опыта находят высшую теплоту сгорания  $Q^p$ .

На практике обычно температура продуктов сгорания, покидающих теплоэнергетическую установку, выше температуры точки росы, и вода, содержащаяся в них, выходит в виде пара, с которым бесполезно теряется и теплота конденсации. Поэтому для оценки реальной теплотворной способности топлив используется понятие низшей теплоты сгорания  $Q_n^p$ , которая представляет собой количество теплоты, выделившейся при полном сгорании 1 кг топлива, без учета теплоты, выделившейся при конденсации водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания.

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

Различие теплот сгорания топлив разных видов, сортов и марок весьма велико. Так, теплота сгорания твердых топлив колеблется от  $(8 \cdot 10^3 \div 12 \cdot 10^3)$  кДж/кг у торфа, до  $(25 \cdot 10^3 \div 26 \cdot 10^3)$  кДж/кг у каменных углей; жидких топлив – от  $40 \cdot 10^3$  кДж/кг у мазутов и до  $47 \cdot 10^3$  кДж/кг у бензинов. Еще больший разброс в теплотах сгорания у газов: если у доменного газа

$Q^p_n = 33,3 \cdot 10^3$  кДж/м<sup>3</sup>, то у попутных газов нефтяных месторождений она поднимается до  $47 \cdot 10^3$  кДж/м<sup>3</sup>.

В силу этого обстоятельства – учет и планирование расхода топлива, контроль за его экономным потреблением сильно затруднены не только в общегосударственных масштабах, но и в пределах любого предприятия. Поэтому для сравнения тепловой ценности различных топлив, вариантов замен одного топлива другим, составления норм расхода топлива и планирования его потребности введены такие технико-экономические понятия, как условное топливо и топливные эквиваленты.

**Условным** называется топливо, имеющее теплоту сгорания  $Q_y = 29\,302$  кДж/кг. Эта величина принята как отправная для планирования расхода и отчета об использовании топлива. Относительная ценность различных топлив рассматривается в сравнении с условным с помощью топливных эквивалентов. **Топливным эквивалентом**  $Э_t$  называется отношение низшей теплоты сгорания рабочей массы реального топлива к теплоте сгорания условного топлива. Топливный эквивалент применяют при планировании расхода топлива и в отчетности.

## 2. Вопросы для самостоятельной работы

1. Виды и классификация твердых природных энергоносителей.
2. Физико–химические свойства твердых природных энергоносителей (влажность, зольность, плотность, выход летучих веществ).
3. Рациональный состав твердого топлива (пересчет на рабочую массу).
4. Древесное топливо: характеристика, состав, свойства.
5. Бурый и каменный уголь: марки, характеристика, состав, свойства.
6. Горючие сланцы: характеристика, состав, свойства.
7. Антрацит: характеристика, состав, свойства.
8. Условное топливо, высшая и низшая теплоты сгорания.
9. Технологии термической переработки твердых природных энергоносителей.
10. Процесс газификации углей.

11. В чем отличие бурых углей от каменных?
12. Назовите среднее значение плотности углей.
13. Какое значение имеет насыпанная плотность углей?
14. От чего зависит плотность углей?
15. Дайте определение кажущейся плотности.
16. Дайте определение действительной плотности
17. Дайте определение насыпной плотности.
18. Какое значение естественного угла откоса имеют антрациты?
19. Как определить действительную плотность углей?
20. Какую пикнометрическую жидкость используют для определения плотности углей?

### **3. Литература для самостоятельного изучения**

1. Андриянцева С.А. Теоретические основы химической технологии природных энергоносителей и углеродных материалов [Электронный ресурс]: Методические указания к лабораторным работам/ Андриянцева С.А., Глазунова И.В. – Электрон. текстовые данные. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2016. – 17 с.  
<http://www.bibliocomplectator.ru/book/?id=74416>
2. Потехин В.М., Потехин В.В. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки: Учебник для вузов. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2005. – 912 с
3. Иванова И.В. Теория горения топлива. Технический анализ твердого топлива: учебное пособие / И.В. Иванова, А.Ф. Смоляков, И.Н. Дюкова, А.А. Куликов. – Санкт-Петербург : СПбГЛТУ, 2016. – 32 с.
4. Кузнецов Б.Н. Глубокая переработка бурых углей с получением жидких топлив и углеродных материалов / Кузнецов Б.Н., Шендрик Т.Г., Щипко М.Л. – Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2012. – 212 с.
5. Гаврилов Ю.В., Королева Н.В., Сеницин С.А. Переработка твердых природных энергоносителей: Учебное пособие / под ред. Н.Г. Дигурова; РХТУ им. Д.И. Менделеева. – М., 2001 – 160 с.

### **САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА №2**

## **ПРОЦЕССЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ УГЛЕЙ И ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ К ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ**

Для повышения качества природного топлива и получения искусственного топлива применяют физико – механические и термические способы переработки. К первым способам относятся обогащение и брикетирование, ко вторым – полукоксование и коксование.

Брикетирование твердых горючих ископаемых (ТГИ) представляет собой процесс механической переработки мелочи в кусковое топливо – брикеты, имеющие определенные геометрическую форму, размеры и массу. Различают два способа брикетирования ТГИ: без связующих веществ, при повышенном давлении прессования (выше 80 МПа), и со связующим веществом, при малых давлениях прессования (15÷25) МПа. По первому способу брикетируются молодые (мягкие) бурые угли и торф, по второму – мелочь каменных и старых (твердых) бурых углей, антрацитовый штыб, полукоксовая и коксовая мелочь.

В течение многих лет в производстве брикетов использовались различные связующие. Их можно классифицировать по нескольким категориям – в зависимости от температуры, при которой формуется брикет, или от температуры первичной термообработки брикетов или же температуры окончательной обработки. Стоимость связующих веществ, обеспечивающих низкотемпературное протекание процесса брикетирования, намного выше, чем цена на связующие, предусматривающие высокотемпературную обработку, но при низкотемпературном брикетировании уменьшаются капитальные затраты и сложность установки. Прочность брикета зависит от силы сцепления связующего материала с поверхностью угольных частичек (силы адгезии) и прочности пленки связующего вещества (силы когезии). Высокотемпературные процессы проходят при температурах от 450 °С до 850 °С, в результате чего происходит спекание частиц в брикет. Низкотемпературные процессы происходят при температурах до 250 °С.

Существует несколько гипотез образования брикета при наложении давления на измельченные ТГИ. Более научно-обоснованной является гипотеза молекулярного прилипания,

разработанная В.М. Наумовичем. В соответствии с этой гипотезой, соединение частичек ТГИ при наложении значительного внешнего давления осуществляется в результате так называемого молекулярного прилипания, зависящего от природы частичек и размера соприкасающихся поверхностей. На действие этих сил значительно влияет капиллярная влага. Наличие капиллярно-конденсационной влаги ослабляет силы сцепления между частичками, поэтому одной из технологических операций по подготовке ТГИ к брикетированию является удаление влаги, например у торфа и бурых углей до  $(16\div 17)\%$ .

Брикет из мелочи с применением связующих образуется в результате процесса сцепления частичек, состоящего из трех стадий: адсорбции связующего вещества частичками ТГИ с проявлением на их поверхности тонкой пленки жидкого вещества, сближения частичек ТГИ и установления между ними контакта при прессовании, затвердевания спрессованной массы в виде брикетов различной формы.

Основные технологические параметры брикетирования ТГИ: влажность, крупность, давление прессования, температура шихты и продолжительность прессования. Эти параметры находятся между собой в определенной зависимости. Зависимость механической прочности брикетов от каждого отдельного параметра брикетирования часто носит экстремальный характер. Значение параметра, при котором получают прочные брикеты, принимается за оптимальное.

Характеристика крупности топлива называется гранулометрическим составом. Гранулометрический состав – это количественная характеристика, отражающая распределение топлива по размеру кусков. Для определения гранулометрического состава используется метод ситового анализа, суть которого заключается в отсеиве пробы топлива на стандартных ситах. Часть топлива, которая остаётся на сите в процессе отсеива, называется остатком и выражается в процентах от взятой навески.

Обогащение угля достигается путём удаления пустой породы и уменьшения содержания влаги. В настоящее время применяют два способа обогащения: гравитационный и флотационный.

Гравитационный способ обогащения основан на отделении

пустой породы и других негорючих примесях, плотность которых отличается от плотности угля, под действием силы тяжести (гравитации). В зависимости от среды, в которой производят разделение исходного материала, различают сухое и мокрое обогащение. В первом случае разделение исходного материала на составные части происходит в потоке воздуха, во втором – воды. Поскольку масса разделяемых частиц исходного материала (уголь, пустая порода, посторонние примеси) зависит не только от плотности частиц, но и от их размера, то уголь предварительно измельчают в дробилке и с помощью грохота разделяют на фракции. Отделённая мелочь, называемая “отсевом”, используется в качестве энергетического топлива. При мокром обогащении разделение дробленого материала производится в движущемся горизонтальном потоке воды под действием пульсирующих восходящих струй воды. Частицы породы, как наиболее тяжёлые (плотность более  $2,0 \text{ г/см}^3$ ), опускаются в нижние слои потока, образуя шлам, а куски топлива ( $1,4 \text{ г/см}^3$  и менее) поднимаются в верхнюю часть потока и выводятся из установки. Полученный обогащённый продукт (концентрат) обезвоживают в грохотах и сушилках и используют в технологических установках и в слоевых топках, а шлам и промежуточный продукт сжигают в пылеугольных топках.

Для мелких фракций углей применяется флотационное обогащение. Флотация основана на различии смачиваемости водой поверхности частиц топлива и пустой породы. Измельчённый материал (размер частиц от 0,3 мм до 0,5 мм) подается в поток воды, через который продувается воздух. Плохо смачиваемые водой (гидрофобные) частицы топлива прилипают к пузырькам воздуха и увлекаются ими вверх, а хорошо смачиваемые водой (гидрофильные) частицы пустой породы опускаются вниз.

При длительном хранении твердого топлива под влиянием физико-химического воздействия воздуха, атмосферных осадков и влаги качество твердого топлива ухудшается. Этот процесс называется выветриванием. Различают физическое и химическое выветривание.

Физическое выветривание происходит в результате резких изменений температуры, вызывающих растрескивание частиц топлива и их измельчение. При химическом выветривании

происходит медленное окисление горючих элементов топлива кислородом атмосферного воздуха, а также кислородом и углекислым газом, содержащимися в атмосферных осадках. Химическое выветривание вызывает изменение состава топлива и понижает его теплотворную способность. (Например, при хранении угля в штабелях в течение 6 месяцев его теплота сгорания снижается на  $(2\div 5)$  %). При этом наиболее подвержено окислению топливо с пористой структурой (например, торф, бурые и молодые каменные угли).

Теплота, выделяемая при медленном окислении, обычно рассеивается в окружающую среду, не вызывая заметного повышения температуры топлива. Однако при определённых условиях, например, в случае местного ухудшения теплоотвода, теплота накапливается в слое топлива, и его температура повышается. С ростом температуры увеличивается и скорость окисления, процесс самоускоряется и может вызвать самовоспламенение топлива.

Для каждого топлива (кроме антрацита, который сам не возгорается) существует так называемая критическая температура, по достижении которой происходит его самовоспламенение. Определяется эта температура экспериментально. Для бурых и каменных углей она составляет  $(60\div 70)$  °С.

Меры по предупреждению самовозгорания: уплотнение наружной поверхности штабеля катками (для предотвращения попадания воздуха внутрь штабеля); побелка поверхности штабеля известковым раствором (в целях уменьшения нагревания штабеля от солнечного излучения); строгое соблюдение технических условий хранения (высота и ширина штабеля, расстояние между штабелями, срок хранения).

## **2. Вопросы для самостоятельной работы**

1. Технология обогащения коксующихся углей.
2. Материальные и тепловые балансы процесса горения твердых природных энергоносителей.
3. Брикетирование твердых природных энергоносителей: характеристика, особенности, основные факторы, влияющие на процесс.



4. Низкосортные виды твердых природных энергоносителей.
5. Технологии переработки горючих сланцев.
6. Установка с твердым теплоносителем для переработки горючих сланцев.
7. Подземная газификация горючих сланцев.
8. Основные продукты термических процессов переработки твердых природных энергоносителей.
9. Отходы подготовки и переработки твердых природных энергоносителей.
10. Утилизация твердых зольных отходов термической переработки природных энергоносителей.
11. Приведите примеры реакций, протекающих в минеральной части углей при их термической переработке.
12. Масса и состав золы равен массе и составу минеральной составляющей угля?
13. Какие реакции преобладают в минеральной части углей при их термической переработке.
14. Что называется летучими веществами?
15. Входит ли водяной пар в состав летучих веществ?
16. Можно ли говорить о содержании летучих веществ в топливе?
17. При какой температуре определяется выход летучих веществ углей?
18. На какие виды в зависимости от выхода летучих веществ делятся угли?
19. Что такое спекаемость?
20. Назовите основные компоненты летучих веществ.

### **3. Литература для самостоятельного изучения**

1. Мунц В.А., Тюльпа В.В. Определение технических характеристик твердого топлива: методические указания к лабораторным работам / В.А. Мунц, В.В. Тюльпа. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2007. – 23 с.
2. Потехин В.М., Сыроежко А.М., Пекаревский Б.В. Теоретические основы процессов переработки природных энергоносителей. Часть I: учебное пособие / В.М. Потехин, А.М. Сыроежко, Б.В. Пекаревский. – СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2010. – 156 с.

3. Михайловский В.П., Мартемьянова Э.Н., Ушаков В.В. Расчеты горения топлива, температурных полей и тепловых установок технологии бетонных и железобетонных изделий: учебное пособие / В.П. Михайловский, Э.Н. Мартемьянова, В.В. Ушаков. – Омск: СибАДИ, 2011. – 262 с.

4. Лурье Л.А. Ископаемые угли и технология их брикетирования – М.: Профтехиздат, 1961. – 288 с.

5. Филоненко Ю.Я., Кауфман А.А., Филоненко В.Ю. Теоретические основы технологии коксования каменных углей: учебное пособие /Ю.Я. Филоненко, А.А. Кауфман, В.Ю. Филоненко. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2015. – 191 с.

6. Глазунова И.В. Технический анализ твердых горючих ископаемых [Электронный ресурс]: Методические указания к лабораторным работам/ Глазунова И.В. – Электрон. текстовые данные. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2017. – 21 с. <http://www.bibliocomplectator.ru/book/?id=74417>.

### **САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА №3**

#### **ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕЙ И ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ**

Термическая переработка, или сухая перегонка, топлива представляет собой процесс его нагревания без доступа воздуха до такой температуры, при которой происходит разложение органической массы и выделение горючих газов. В зависимости от конечной температуры нагрева, различают полукоксование, или низкотемпературное коксование, которое завершается при температуре (500÷550) °С, и высокотемпературное коксование, заканчивающееся при  $t = (1000\div 1100)$  °С.

В процессе полукоксования происходит интенсивное выделение газообразных углеводородов и образование первичных смол, которые подвергаются затем технологической переработке с целью получения жидких моторных топлив, смазочных масел, фенола, пека. Твердый остаток – полукокк – является топливом с повышенной реакционной способностью (так называемое

“бездымное топливо”).

Для полукоксования используются угли, дающие при сухой перегонке значительное количество жидких смолопродуктов. Таким топливом являются бурые угли, горючие сланцы и молодые каменные угли. Газ полукоксования имеет сравнительно малую теплоту сгорания ( $9\div 15$ ) МДж/м<sup>3</sup> и используется как местное топливо.

При высокотемпературном коксовании полностью завершаются процессы разложения органических веществ топлива и выделения газо- и парообразных соединений. Твердый остаток (кокс) состоит из углерода и минеральных примесей (золы). Содержание летучих веществ в коксе незначительно. Кокс является ценным технологическим топливом металлургических процессов. Попутный продукт высокотемпературного коксования - коксовый газ - состоит из водорода, оксида углерода и углеводородов. Теплота сгорания ( $16,7\div 18$ ) МДж/м<sup>3</sup>.

Физические свойства кокса (твердость, механическая прочность) зависят от состава органических соединений и вида топлива, применяемого для коксования. Топливо, имеющее в своем составе компоненты, которые при нагревании без доступа воздуха (при температуре  $(350\div 470)$  °С) сначала расплавляются, а затем при выделении летучих веществ становятся более тугоплавкими и затвердевают, относится к спекающимся, или коксующимся. Из такого топлива при коксовании образуется механически прочный спекшийся или сплавленный кокс, применяемый в металлургии.

Для газификации применяют все известные виды твердого топлива, начиная от дров и кончая антрацитом. Однако не все сорта топлива пригодны для газификации. Требования к качеству топлива для газификации в значительной степени определяются способом газификации. Например, для газификации топлива в слоевых газогенераторах с мокрым золоудалением топливо должно иметь тугоплавкую золу, во избежание шлакования газогенератора, а для газификации топлива в газогенераторах с жидким шлакоудалением легкоплавкость золы является положительным фактором.

Целевое назначение процесса коксования – производство металлургического кокса. Каменный уголь специальных марок (коксующийся уголь) или смесь углей (шихту) нагревают без

доступа воздуха примерно до 1000 °С в специальных коксовых печах.

Коксование сопровождается глубокими химическими превращениями органической массы углей, при которых, как и в процессах термического расщепления нефтепродуктов, образуются кокс, жидкие продукты коксования и газ. Уголь беднее водородом, чем нефть, и поэтому выход кокса очень велик (75÷80) %, а выход жидких продуктов незначителен (4÷5) %.

Органическая масса углей состоит из углеводов, кислород-, серо- и азотсодержащих соединений сложного строения. Последние три класса веществ разлагаются при коксовании с выделением воды, оксидов углерода, H<sub>2</sub>S, сероуглерода, аммиака, а также низших кислород-, серо- и азотсодержащих органических соединений (фенол, тиофен, пиридин и их гомологи) и их более сложных аналогов с конденсированными ядрами. Углеводороды, первоначально содержащиеся в угле и полученные при разложении веществ других классов, подвергаются глубоким химическим превращениям. В их основе лежат те же реакции пиролиза и ароматизации, как и при термических превращениях нефтепродуктов. В результате получается широкая гамма ароматических углеводородов: бензол, толуол, ксилолы, три- и тетраметилбензолы, нафталин, антрацен, фенантрен, их гомологи и еще более многоядерные углеводороды. Высокая температура коксования обуславливает полную ароматизацию образующихся жидких продуктов: в них содержание соединений других классов (олефинов) не превышает (3÷5) %.

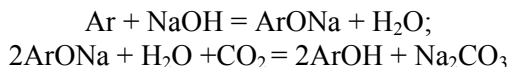
Коксовый газ обогащен термодинамически более стабильными углеводородами и водородом. В нем содержится 60 % водорода, 25 % метана и (2÷3) % этилена. Как органическое сырье он интереса не представляет, его используют как газообразное топливо и для получения водорода.

Процесс коксования угля происходит в камерных печах, обогреваемых через стенку топочными газами. С целью более равномерного нагревания шихты камеры делают узкими (400÷450) мм и располагают несколько десятков таких камер параллельно друг другу. Так получается коксовая батарея, в которой между парой камер имеются обогревательные простенки для

движения горячих топочных газов.

Коксовый газ, выходящий из печи, содержит пары летучих органических соединений, воды, аммиака. Дальнейшая переработка газа состоит в конденсации малолетучих веществ и улавливании  $\text{NH}_3$ , пиридиновых оснований и несконденсировавшихся соединений.

Ароматические соединения, образовавшиеся при коксовании, находятся в каменноугольной смоле и в сыром бензоле. Выход каменноугольной смолы составляет (32÷34) кг, а сырого бензола – (10÷11) кг на 1 т сухого угля. Выделение и очистка ароматических соединений проводятся на широких или более узких фракциях, полученных при ректификации продуктов. В случае сырого бензола и смолы коксования одной из стадий является выделение фенолов путем обработки фракций водным раствором щелочи, а из щелочного раствора фенолы регенерируют при помощи диоксида углерода:



Этот коксохимический метод был первым для получения фенола, крезолов и ксиленолов.

Следующим этапом является очистка фракций от олефинов. Так как в коксохимических продуктах содержание олефинов невелико, применяется сернокислотный способ, состоящий в обработке фракций (90÷93) %-й  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . При этом часть олефинов дает кислые алкилсульфаты и переходит в кислый слой, а остальные полимеризуются. Заключительной стадией процесса очистки является ректификация, целью которой является получение товарных продуктов.

Для выделения ароматических углеводородов с конденсированными циклами (нафталин, антрацен, фенантрен) используется метод кристаллизации. Из антраценовых фракций каменноугольной смолы (270÷330) °С сплавлением с КОН и последующим гидролизом выделяют ценное для органического синтеза вещество – карбазол.

Нафталин до сих пор получают из нафталиновой фракции

каменноугольной смолы (210÷230) °С. Ее кристаллизуют в охлаждаемых водой барабанных кристаллизаторах. Сырой продукт отжимают от масел при нагревании на гидравлических прессах, получая так называемый прессованный нафталин (температура кристаллизации не менее 78 °С, содержание нафталина (96÷98) %). После обработки  $H_2SO_4$  и перегонки получают чистый кристаллический нафталин.

## **2. Вопросы для самостоятельной работы**

1. Дайте определение понятию «топливо».
2. Для чего предназначено энергетическое и технологическое топливо?
3. Приведите примеры искусственного вида топлива различного агрегатного состояния.
4. Из чего состоят горючая и негорючая части топлива?
5. Что такое балласт топлива?
6. Что является главной горючей составляющей всех видов топлив?
7. В каких видах сера входит в состав топлив?
8. В чем отличие рабочей, сухой, аналитической и горючей масс топлива?
9. Дайте определение теплоты сгорания топлива.
10. В чем отличие высшей теплоты сгорания топлива от низшей?
11. Для чего используется высшая теплота сгорания топлива? Низшая?
12. Как можно найти теплоту сгорания твердого или жидкого топлива если известен его элементарный состав?
13. Что называется условным топливом?
14. Как найти топливный эквивалент?
15. Какие температуры используются в теплотехнике в качестве температурных характеристик?

## **3. Литература для самостоятельного изучения**

1. Антонина З. Химические технологии. Учебное пособие для химико-технологических специальностей профессиональных

центров// Йыхви. – 2012. – 376 с.

2. Блохин А.И., Зарецкий А.И., Стельмах Г.П. Новые технологии переработки высокосернистых сланцев / А.И. Блохин, М.И. Зарецкий, Г.П. Стельмах. М. : Светлый СТАН, 2001. - 189 с.

3. Стрижакова Ю.А., Усова Т.В. Процессы переработки горючих сланцев. История развития. Технологии / Ю.А. Стрижакова, Т.В. Усова; под ред. А.Л. Лapidуса. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2008. – 120 с.

4. Иванова И.В. Теория горения топлива. Технический анализ твердого топлива [Электронный ресурс]: учебное пособие / И.В. Иванова, А.Ф. Смоляков, И.Н. Дюкова, А.А. Куликов. – Электрон. дан. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2016. – 32 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/74025>.

#### **САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА №4** **ГАЗИФИКАЦИЯ УГЛЕЙ: АГРЕГАТЫ И ОСНОВНЫЕ** **ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА**

Газообразное топливо получают из твердого путем его сухой перегонки (коксовый или полукоксый газ) или безостаточной газификации в газогенераторах. При продувании в газогенераторе через слои раскаленного топлива воздуха получают воздушный газ. При продувании слоя топлива воздухом и водяным паром получают смешанный генераторный газ. При продувании слоя топлива водяным паром получают водяной газ. В этом случае для компенсации эндотермичности процесса взаимодействия углерода топлива с водяным паром осуществляют экзотермический процесс продуванием топлива воздухом (горячее дутье) и, таким образом, получение водяного газа осуществляют в два периода. Эндотермичность процесса возможно компенсировать также добавкой к водяному пару кислорода. Технические показатели процесса, получаемые при различных способах газификации, зависят от качества топлива, режима работы и других факторов, специфических для каждой газогенераторной установки. Тем не менее, при всем разнообразии данных имеется возможность выбрать наиболее типичные показатели для наиболее употребительных видов топлива, которые приводятся ниже.

Газификация в слоевых газогенераторах по непрерывному

методу. По этому способу производят паровоздушный газ, получивший самое широкое распространение в промышленности в качестве искусственного топлива. В качестве дутья в газогенератор подается смесь воздуха и пара. В этом случае водяной пар, проходя вместе с воздухом через окислительную зону, перегревается за счет тепла зоны и тем самым снижает температуру в ней. Вступив в восстановительную зону, перегретый пар разлагается с образованием горючих компонентов. Так как реакции разложения водяного пара протекают с поглощением тепла, то при этом происходит снижение температуры в зоне восстановления. Таким образом, применение паровоздушного дутья позволяет использовать излишек тепла, образующийся в окислительной зоне для повышения теплоты сгорания газа, устраняя явления шлакования. Это последнее обстоятельство и позволяет удалять шлак в твердом виде через водяной затвор газогенератора.

Газификация в газогенераторах по периодическому методу. По этому способу получают водяной газ. Так как процесс получения водяного газа состоит в попеременном продувании слоя топлива воздухом и паром, газогенератор с сухим золоудалением оказался наиболее подходящим агрегатом для этой цели. Процесс получения водяного газа ведется периодически. Сначала в газогенератор вдувается один воздух. Благодаря сгоранию топлива слой нагревается до нужной температуры. После достижения нужного нагрева слоя топлива вдувание в газогенератор воздуха прекращается и начинается подача пара. За счет тепла, аккумулированного слоем за время подачи воздуха, происходит разложение пара с образованием водяного газа. Подача пара продолжается до тех пор, пока температура в слое топлива не снизится до такого уровня, при котором разложение пара прекратится или сильно сократится. После этого прекращается подача пара и возобновляется подача воздуха и т. д. Для тепловой работы слоя большое значение имеет направление парового дутья. При подаче пара в одном направлении снизу вверх неизбежно происходит охлаждение нижней части слоя и перемещение зоны газификации вверх. При паровом дутье сверху вниз пар до поступления в зону газификации перегревается за счет тепла верхней части слоя, что благоприятно отражается на протекании



процесса газификации и одновременно приводит к выравниванию температуры слоя. По указанной причине оказывается рациональным паровое дутье осуществлять поочередно, то снизу вверх, то сверху вниз.

Газификация в «кипящем слое». По этому способу получают: а) паровоздушный газ; б) парокислородный газ. Газификации в «кипящем слое» подвергается мелкозернистое топливо высокой реакционной способности. Дутье, подаваемое в газогенератор, обеспечивает скорости потока в  $(2\div 3)$  м/с, при которых топливо, находящееся на колосниковой решетке, приходит в движение, по внешнему виду напоминающее кипение жидкости. В качестве дутья применяют парокислородную смесь, либо воздух.

Подземная газификация топлива. В настоящее время для подготовки подземных газогенераторов применяют бесшахтный способ, по которому подготовленные работы сводятся к бурению скважин с поверхности земли до угольного пласта и последующей сбойке (соединению) их с применением либо сжатого воздуха под высоким давлением, либо электрического тока высокого напряжения, либо других методов, исключающих необходимость выполнения подземных работ.

Газификаторы для газификации торфа и бурых углей. На рисунке 1 изображен газогенератор со швельшахтой с двумя отъемами газа, который часто применяется для газификации торфа, щепы и бурых углей. Швельшахтой 1 называется шахта меньшего сечения, расположенная над основной шахтой 2. Газы, поднимающиеся из основной шахты 2 в швельшахту, нагревают топливо до оптимальных температур, при которых получается наибольшее количество ценной смолы, образующейся при газификации торфа и бурых углей.

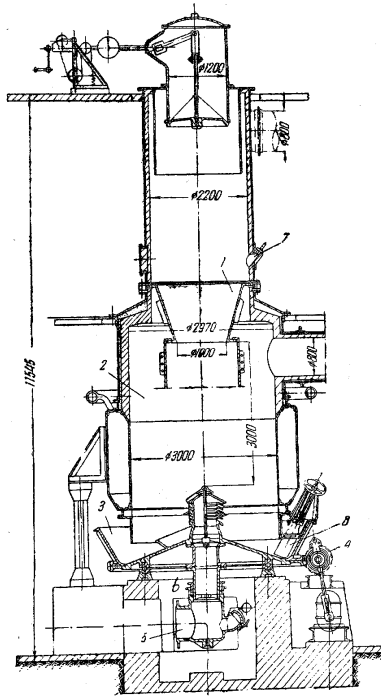


Рис. 1. Схема газогенератора со шпельшахтой

Если топливо содержит значительное количество влаги (например, торф), то через шпельшахту направляется весь газ, образовавшийся в основной шахте; если же топливо сухое, то часть газов отбирается у основания шпельшахты, и только основной газ проходит через нее. Сечение газогенератора круглое.

Торф и особенно бурый уголь всегда более богаты золой, чем древесное топливо; накапливающуюся золу необходимо удалять из генератора без расстройтва его хода. Кроме того, многие угли имеют легкоплавкую золу; во время газификации зола, размягчаясь, склеивает куски топлива и приваривается в виде настелей к стенкам шахты и колосникам. Поэтому конструкция газогенератора предусматривает непрерывное удаление золы и возможность разбивать и удалять образовавшиеся настели.

В нижней части газогенератора (рис. 1) имеется чугунная чаша 3, которая посредством червячной передачи 4 медленно вращается (со скоростью около 1 об/час). Неподвижная основная шахта подвешена на колоннах и нижней своей частью входит в чашу 3, в которую налита вода; образующийся гидравлический затвор не позволяет дутью вырваться из газогенератора. Воздух и водяной пар подаются в газогенератор через воздухопровод 5. Колосники 6 состоят из отдельных образующих конус колец. Через зазоры между кольцами поступают воздух и водяной пар и равномерно распределяются по сечению газогенератора.

Все колосниковое устройство прикреплено к чаше и вращается вместе с ней. Выступы колосников заставляют вращаться прилегающую к ним золу с углем, препятствуя образованию больших настывлей; если же они и образуются, то их разбивают при помощи ломиков, которые вводятся в газогенератор через шуровочные отверстия 7.

Зола по конической части колосников опускается в воду на дно чаши. Удаляют золу из газогенератора автоматически; для этого в чашу опускают лопатку 8, которая скрепляется с ней неподвижным корпусом газогенератора. При движении чаши зола набегает на лопатку и ссыпается по желобу в вагонетку, установленную сбоку чаши.

Газогенераторы для каменных углей. Вследствие сравнительно малой влажности каменных углей, а также малого развития пояса подготовки топлива (сушка, сухая перегонка) высота слоя топлива в газогенераторе не превышает 3 м. Механизированный газогенератор. Характерная особенность его - вращающаяся шахта и неподвижная колосниковая решетка. Для облегчения движения золы чаша может вращаться вместе с шахтой. Газогенератор снабжен автоматическим питателем. Шуровка верхнего слоя производится охлаждаемым водой, качающимся по отношению к колосниковой решетке газогенератора. Движение шахты и шуровщика способствуют тщательному размешиванию всего слоя угля. Неподвижная крышка газогенератора соединена с вращающейся шахтой посредством водяного затвора. Генераторный газ отводится через отверстие.

Производительность газогенератора определяется интенсивностью газификации, т. е. количеством топлива, газифицированного в час на каждый квадратный метр сечения газогенератора колосниковой решетки ( $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{час}$ ) Интенсивность газификации в зависимости от рода топлива и конструкции газогенератора колеблется от  $160 \text{ кг}/\text{м}^2 \cdot \text{час}$  до  $520 \text{ кг}/\text{м}^2 \cdot \text{час}$ . Диаметр шахт газогенераторов достигает 3,6 м. Коэффициент полезного действия ( $70 \div 85$ ) %.

Развитие методов газификации топлива. Для получения водяного газа преимущественно применяется высококалорийное топливо - кокс и антрацит. Стремление заменить их битуминозными углями привело к производству двойного газа, т. е. смеси водяного газа со светильным, образованным в результате сухой перегонки. Двойной газ получается в специальных генераторах, имеющих швельшахту. В швельшахте происходит сухая перегонка топлива, а в нижней шахте получается водяной газ. Наличие в газе углеводородов и смол сообщает ему ценные свойства - повышенную теплотворность (до  $3500 \text{ ккал}/\text{нм}^3$ ) и увеличение светимости пламени.

Смесь водяного, светильного и генераторного газов, получаемая в генераторах непрерывного действия, носит название тройного водяного газа. Для бытовых целей применяется также комбинированный газ - смесь водяного (двойного и тройного) газа с отбросными высококалорийными газами (например, нефтяным) или с естественным газом.

Невысокая теплотворность генераторного газа обуславливается значительным содержанием в нем азота. При обогащении кислородом воздуха, вдвухаемого в генератор, содержание азота в газе уменьшается и калорийность его повышается. Насколько улучшается качество газа при применении кислородного дутья, можно судить по следующим данным. Теплотворность газа, полученного из торфа,  $2200 \text{ ккал}/\text{нм}^3$  при работе генератора на дутье с 40 % кислорода и  $2600 \text{ ккал}/\text{нм}^3$  при 60 % кислорода вместо ( $1400 \div 1500$ )  $\text{ккал}/\text{нм}^3$  при работе на обычном паро-воздушном дутье.

В последнее время для передачи газа на большие расстояния приобретает значение газификация топлива под

высоким давлением (20÷30) ат. С повышением давления равновесные состояния газовых реакций в генераторе характеризуются увеличением в газовой фазе количества более сложных молекул, в частности метана. Генераторный газ, очищенный от  $\text{CO}_2$ , с повышенным содержанием метана имеет теплотворность выше  $4000 \text{ ккал/нм}^3$ , поэтому передача его на дальние расстояния выгодна.

Один из методов повышения производительности генератора - газификация топлива с жидким шлакоудалением. Нижняя часть шахты генератора делается в виде горна, из которого периодически выпускается расплавленная зола. Повышенная температура в реакционной зоне ускоряет газификацию и увеличивает производительность генератора до  $1000 \text{ кг/м}^2\text{час}$ . Твердое топливо можно газифицировать не только в виде кусков, но также в виде мелочи и пыли, причем вследствие значительно развитой активной поверхности частиц интенсивность газификации их увеличивается.

Метод газификации мелкозернистого топлива, разработанный институтом газа и искусственного жидкого топлива, заключается в следующем. Топливо подается сверху в шахту специального газогенератора. Навстречу падающему потоку мелкозернистого топлива движется воздух, вдуваемый в нижнюю часть газогенератора. Вследствие высокой температуры частицы топлива горят во время их полета через шахту или во взвешенном состоянии. Интенсивность газификации достигает  $1300 \text{ кг/м}^2\text{час}$ . Второй способ газификации мелочи носит название газификации в кипящем слое. Сущность его заключается в следующем. Топливо подается шнеком на колосниковую решетку газогенератора. Воздух для газификации подается через прозоры между колосниками со скоростью (2÷3) м/сек. При такой скорости частицы топлива приходят в движение, по внешнему виду напоминающие кипение. При этом происходит их быстрая газификация (до  $2400 \text{ кг/м}^2\text{час}$ ).

## **2. Вопросы для самостоятельной работы**

1. Назовите горючие элементы твердого и жидкого топлива.
2. Что является внутренним балластом топлива?

3. Что является внешним балластом топлива?
4. Назовите значение удельной теплоты сгорания углерода?
5. В каком виде содержится сера в топливе?
6. Какая температура называется калориметрической?
7. Что называется жаропроизводительностью?
8. От чего зависит калориметрическая температура?
9. Что происходит с калориметрической температурой при увеличении коэффициента расхода воздуха?
10. Какую температуру называют нормальной калориметрической температурой?
11. Дайте характеристику торфу.
12. С каким выходом летучих веществ ископаемые угли можно отнести к антрацитам?
13. Дайте характеристику горючим сланцам.
14. В каких состояниях находится влага в ископаемых углях?
15. Какая влага наименее прочно связана с углем?

### **3. Литература для самостоятельного изучения**

1. *Кузнецов Б.Н.* Глубокая переработка бурых углей с получением жидких топлив и углеродных материалов /Б.Н. Кузнецов., Т.Г. Шендрик, М.Л. Щипко. – Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2012. – 212 с;

2. *Филоненко Ю.Я.* Теоретические основы технологии коксования каменных углей: учебное пособие/Ю.Я. Филоненко, А.А. Кауфман, В.Ю. Филоненко. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2015. – 191 с;

3. *Иванова И.В.* Теория горения топлива. Технический анализ твердого топлива: учебное пособие / И.В. Иванова, А.Ф. Смоляков, И.Н. Дюкова, А.А. Куликов. –Санкт-Петербург : СПбГЛТУ, 2016. – 32 с;

4. *Михайловский В.П.* Расчеты горения топлива, температурных полей и тепловых установок технологи бетонных и железобетонных изделий: учебное пособие / В.П. Михайловский, Э.Н. Мартемьянова, В.В. Ушаков. – Омск: СибАДИ, 2011. – 262 с;

5. *Сардашвили А.Г.* Примеры и задачи по технологии переработки нефти и газа / А.Г. Сардашвили, А.И. Львова. – М., Химия, 1980. – 256 с;

6. *Моисеев А.В.* Расчетные методы определения физико-химических свойств углеводородных систем, нефтей и нефтепродуктов: Примеры и задачи: учебное пособие / А.В. Моисеев. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. – 179 с.

## **САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА №5 ПОЛУЧЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ГАЗОВ ГАЗИФИКАЦИЕЙ УГЛЕЙ И ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ**

Газификация - высокотемпературный процесс взаимодействия углерода топлива с окислителями, проводимый с целью получения горючих газов ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ). В качестве окислителей, которые иногда называют газифицирующими агентами, используют кислород (или обогащенный им воздух), водяной пар, диоксид углерода либо смеси указанных веществ. В зависимости от соотношения исходных реагентов, температуры, продолжительности реакции и других факторов можно получать газовые смеси самого разного состава.

Впервые промышленная реализация газификации твердых топлив была осуществлена в 1835 г. в Великобритании. К середине XX в. этот процесс получил широкое развитие в большинстве промышленных стран мира. Например, в СССР в 50-е годы работало свыше 350 газогенераторных станций, на которых было установлено около 2500 газогенераторов. Эти станции вырабатывали ежегодно 35 млрд  $m^3$  энергетических и технологических газов. Как известно, в последующие 20÷25 лет в мировом энергетическом балансе происходили изменения, обусловленные ростом добычи и потребления нефти, попутных и природных газов. Вследствие этого конкурентоспособность искусственных энергетических и технологических газов, получаемых из твердых топлив, резко снизилась, и их производство практически повсеместно (за исключением ЮАР) было прекращено. Однако в последние годы в связи с сокращением ресурсов нефтяного и газового сырья процесс газификации твердых горючих ископаемых вновь привлек к себе внимание, искусственные газы опять начинают рассматриваться как одна из существенных составляющих теплового баланса.

В настоящее время выявились наиболее экономически

эффективные области применения рассматриваемого метода:

- газификация сернистых и многозольных топлив с последующим сжиганием полученных газов на мощных тепловых электростанциях. В углях содержится около 10 млн. т серы, большая часть которой при сжигании выбрасывается в атмосферу в виде токсичных оксидов серы и серооксида углерода. При газификации сернистых углей образуется сероводород, который можно сравнительно легко извлечь и затем переработать в товарную серу или серную кислоту;
- газификация твердых топлив для крупномасштабного производства заменителей природного газа. Это направление имеет наибольшее значение для местного газоснабжения районов, удаленных от месторождений природного газа и нефти или от магистральных трубопроводов;
- газификация твердых топлив с целью получения синтез-газа, газов-восстановителей и водорода для нужд химической, нефтехимической и металлургической промышленности.

Процесс газификации зависит от многих факторов, влияющих на состав получаемого газа и его теплоту сгорания. В связи с этим до сих пор отсутствует единая общепринятая классификация методов осуществления рассматриваемого процесса. Ниже приведены возможные варианты классификации:

- по виду дутья (газифицирующего агента): воздушное, воздушно-кислородное, паровоздушное, парокислородное;
- по давлению: при атмосферном давлении, при повышенном давлении;
- по размеру частиц топлива: газификация крупнозернистого (кускового), мелкозернистого и пылевидного топлива;
- по конструктивным особенностям реакционной зоны; в неподвижном плотном слое топлива, в псевдоожигенном слое топлива, в пылеугольном факеле;
- по способу выведения золы: в твердом виде, в виде жидкого



шлака;

- по способу подвода тепла: при частичном сжигании топлива в газогенераторе, при смешении топлива с предварительно нагретым твердым, жидким или газообразным теплоносителем (регенеративный нагрев), при подводе тепла через стенку аппарата (рекуперативный нагрев);
- по назначению получаемого газа: получение газов с заданной теплотой сгорания (низкой – до  $6700 \text{ кДж/м}^3$ , средней –  $(12000 \div 18000) \text{ кДж/м}^3$  и высокой –  $(30000 \div 35000) \text{ кДж/м}^3$ ); получение газов заданного состава;
- по способу обогащения конечного газа метаном: безостаточная газификация топлива в  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2$  в сочетании с отдельной стадией метанирования  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  водородом; газификация с полным выделением летучих и максимальным образованием метана в слое топлива; гидрогазификация.

Газификации может быть подвергнуто большинство известных видов твердых горючих ископаемых. При этом можно получить газ заданного состава или заданной теплоты сгорания, так как эти показатели в значительной степени определяются температурой, давлением и составом применяемого дутья.

Газ с низкой теплотой сгорания образуется при использовании воздушного или паровоздушного дутья. В соответствии с этим его называют воздушным или паровоздушным (смешанным). Он характеризуется высоким содержанием балласта – азота  $[(40 \div 50) \% (\text{об.})]$ , что обуславливает низкую теплоту сгорания такого газа. Основная область применения таких газов сжигание в топках промышленных печей. После конверсии содержащегося в них оксида углерода и очистки от  $\text{CO}_2$ , получают азотоводородную смесь – исходное сырье для синтеза аммиака.

Газы со средней теплотой сгорания получают в процессах паровой или парокислородной газификации твердых топлив под давлением до  $(2 \div 2,5) \text{ МПа}$ . По составу они представляют собой смеси оксидов углерода и водорода с небольшими количествами метана и других углеводородов:  $(30 \div 35) \% (\text{об.}) \text{ CO}_2$ ,  $(10 \div 13) \% (\text{об.}) \text{ CO}$ ,  $(38 \div 40) \% (\text{об.}) \text{ H}_2$ ,  $(10 \div 12) \% (\text{об.}) \text{ CH}_4$ ,  $(0,5 \div 1,5) \% (\text{об.}) \text{ C}_n\text{H}_{2n}$ . По экономическим соображениям такие газы применяют в

ограниченных масштабах. Их используют главным образом как химическое сырье, а также начинают применять в металлургии в качестве газов-восстановителей.

Технология получения указанных газов первоначально была основана на использовании паровоздушного дутья, причем воздух предварительно обогащался кислородом до 40 % (об.). Наряду с этим повысить теплоту сгорания газа можно, проводя газификацию при повышенном давлении. Другой способ получения газов со средней теплотой сгорания – газификация твердых топлив с применением парового дутья и предварительно нагретого до 1100 °С твердого теплоносителя. В качестве последнего можно использовать золу, остающуюся после сжигания части топлива в выносной топке. Подобный вариант позволяет получать газ, состоящий в основном из CO и H<sub>2</sub> в соотношении, близком к 1:1, однако этот способ опробован пока лишь на небольших опытно-промышленных установках.

Газы с высокой теплотой сгорания, приближающиеся по этому показателю к природному газу, в настоящее время в промышленных масштабах пока не производят. Однако технология их получения в ряде случаев отработана на достаточно крупных опытно-промышленных установках. Основа повышения теплоты сгорания газа – обогащение его метаном за счет проведения газификации при повышенном давлении, благодаря чему интенсифицируется взаимодействие углерода и его оксидов с водородом, образующимся в слое топлива. Продуктом этих реакций является метан. Разработано несколько вариантов многоступенчатых газогенераторов, в которых предусмотрены максимальное извлечение летучих продуктов из топлива и последующая газификация углеродного остатка с применением водородсодержащих газов в качестве газифицирующего агента (гидро – газификация). Наряду с этим газ, обогащенный метаном, может быть получен из низко- и среднекалорийного газа путем гидрирования содержащихся в нем оксидов углерода в выносном реакторе (вне газогенератора). Газы заданного состава предназначены для непосредственного синтеза химических продуктов и представляют собой смеси водорода с азотом или оксидом углерода либо технический водород.

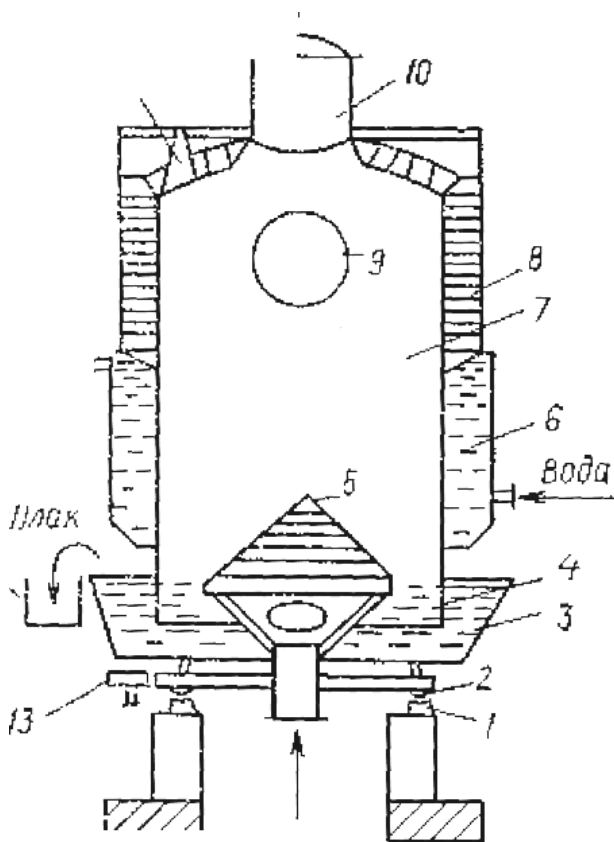
На первых этапах развития газификации аппараты,

применяемые в этом процессе, имели сравнительно высокий плотный слой топлива и неподвижную колосниковую решетку. Шлак выгружали вручную, вследствие чего производительность газогенераторов была невелика. Воздушное дутье подавали за счет естественной тяги, поэтому получаемые газы характеризовались невысокой теплотой сгорания, а сам процесс газификации имел очень ограниченное распространение. Широкое промышленное применение этот метод получил в первой четверти XX в. благодаря разработке газогенераторов с вращающейся колосниковой решеткой. Это позволило механизировать трудоемкий процесс удаления шлака и повысить производительность аппаратуры. Газогенераторы такого типа широко использовались в большинстве промышленно развитых стран вплоть до 60-х годов, обеспечивая практически полностью потребность в технологических, энергетических и бытовых горючих газах. Схема газогенератора с вращающейся решеткой изображена на рисунке 2.

На катках 2, движущихся по рельсовой опоре 1, установлена металлическая чаша 3, вращающаяся от привода 13. В центре чаши располагается колосниковая решетка 5 из чугунных пластин с отверстиями, имеющая форму шатра. Чаша 3 заполнена водой, предназначенной для охлаждения поступающего в нее шлака, кроме того, она служит гидравлическим затвором, изолирующим внутреннее пространство аппарата от атмосферы. В воду, находящуюся в чаше, погружена нижняя часть 4 («фартук») шахты 7 газогенератора. Глубина погружения «фартука» определяет допустимое давление в аппарате. Шахта опирается на фундамент с помощью опор, расположенных в ее средней части (на рисунке не показаны). Шахта имеет в верхней части устройство 10 для загрузки топлива, штуцер 9 для вывода газа (газослив), футеровку 8 и водяную рубашку 6. На колосниковой решетке находится плотный слой топлива, высота которого почти достигает штуцера 9.

Снизу по трубопроводу подают дутье. Для более равномерного распределения дутья по сечению верхний колосник решетки (называемый «головкой», или «чепцом») располагают не в ее центре, а несколько смещая в сторону. В слое топлива, прилегающем непосредственно к колосниковой решетке, происходит его сгорание, в результате чего развиваются высокие температуры и

выделяется тепло, требуемое для газификации. Это так называемая зона окисления.



1 – рельсовая опора; 2 – каток; 3 – чаша; 4 – «фартук»; 5 – колосниковая решетка; 6 – водяная рубашка; 7 – шахта; 8 – футеровка; 9 – газослив; 10 – загрузочное устройство; 11 – шуровочное отверстие; 12 – шлакоприемник; 13 – привод

Рис. 2. Газогенератор с вращающейся колосниковой решеткой

Полученный здесь поток раскаленных газообразных продуктов сгорания поступает в верхние слои топлива (в зону восстановления), где происходят основные реакции газификации,

приводящие к образованию целевых продуктов ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ). Вследствие сильной эндотермичности реакций образования оксида углерода и водорода газы охлаждаются до  $(300\div 500)^\circ\text{C}$  и затем поступают в верхние слои, где за счет их тепла происходят полукоксование (сухая перегонка) и подсушка топлива. В этой зоне выделяются смола и летучие продукты, а также вся влага, содержащаяся в топливе, т. е. здесь происходит подготовка топлива к газификации. Шлак, остающийся на колосниковой решетке, при ее вращении опускается вниз, охлаждается в чаше с водой и выводится из аппарата в приемник 12. В рассмотренном газогенераторе происходило периодическое налипание шлака на стенки. Его удаляли вручную при помощи металлических штанг, пропускаемых сквозь шуровочные отверстия 11. При переработке спекающихся топлив для предотвращения слипания непрерывно перемешивали слой топлива мешалкой, способной одновременно перемещаться и в вертикальной плоскости. Для газификации молодых топлив, имеющих большой выход летучих, зону подготовки выполняли высотой  $(4\div 5)$  м (она называлась «швельшахтой»).

До середины XX в. большое распространение имел процесс получения водяного газа в аппаратах периодического действия. Водяной газ, представляющий собой в основном смесь  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$  с небольшой примесью других компонентов, широко использовали для энергетических целей, как сырье для синтеза аммиака и искусственного жидкого топлива, для бытовых нужд, а также для таких высокотемпературных процессов, как резка и сварка металлов. Основная особенность используемых для этой цели газогенераторов — отсутствие водяного затвора (вместо него установлен сухой шлакоудалитель). Зольная чаша была заменена герметичным кожухом с одним или двумя бункерами, из которых шлак периодически удаляли. Необходимое тепло получали, продувая через слой топлива воздух (фаза горячего дутья), благодаря чему развивались высокие температуры  $(850\div 900)^\circ\text{C}$ . Затем в газогенератор подавали перегретый до  $(600\div 700)^\circ\text{C}$  водяной пар, который, взаимодействуя с раскаленным топливом, образовывал целевой продукт — водяной газ (фаза холодного дутья). После снижения температуры до  $\sim 650^\circ\text{C}$  прекращали подачу пара и возобновляли воздушное дутье. Продолжительность фазы горячего

дутья составляла ~1 мин, холодного ~3 мин.

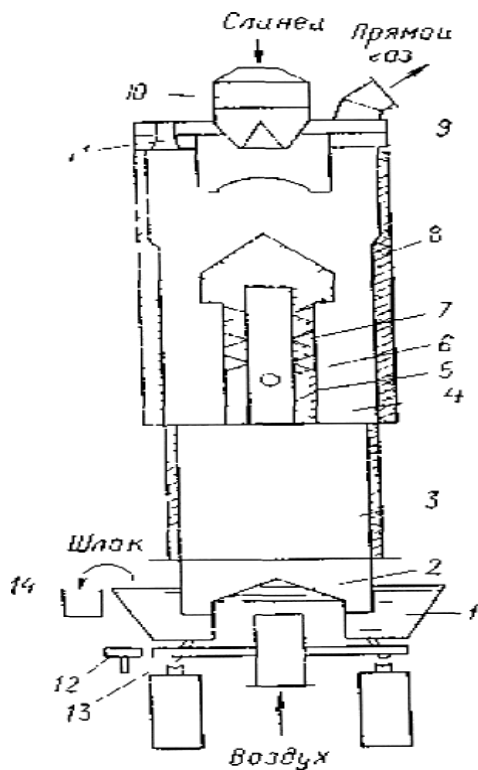
В 20-х годах некоторое распространение получили безрешетчатые газогенераторы с плотным слоем топлива и жидким шлакоудалением. Это позволяло перерабатывать высокозольные топлива. Рассмотренные способы газификации твердого топлива в плотном слое при атмосферном давлении в настоящее время почти утратили промышленное значение из-за невысокой производительности реакционной аппаратуры. Единственным вариантом такого процесса, достаточно широко используемым в промышленности, является газификация горючих сланцев. Как известно, при переработке сланцев образуется большое количество ценной смолы, для отгонки которой газогенератор снабжают высокой швельшахтой. Под ней расположена зона газификации полукокса, предназначенная для получения газа, который, поднимаясь в швельшахте, выполняет функцию внутреннего теплоносителя. Нижняя часть аппарата (рис.3) имеет вращающуюся чашу 1, заполненную водой, и колосниковую решетку 2, над которой располагается зона газификации полукокса, опускающегося из швельшахты 4.

Ввиду высокой зольности полукокса тепло, выделяющееся при его газификации на воздушном дутье, обеспечивает лишь 60 % тепла, необходимого для полукоксования сланца в швельшахте. Поэтому в швельшахте размещена топка 5, в горелке 6 которой сжигают некоторую часть обратного газа (очищенного от паров смолы).

Дымовые газы через дюзы 7 поступают в слой топлива и смешиваются с газообразными продуктами, поднимающимися из зоны газификации. Парогазовая смесь выводится из аппарата через газослив 9, а полукокс опускается в зону газификации.

Наиболее распространена в настоящее время газификация крупнозернистого топлива в плотном слое методом Lurgi, осуществляемым при повышенном давлении. Этот метод применяется на заводах разных стран мира, на которых эксплуатируется более 60 газогенераторов Lurgi. Ранее было показано, что увеличение давления позволяет существенно повысить теплоту сгорания получаемого газа за счет протекания реакций метанирования. Эти реакции экзотермичны, благодаря чему при

$P=(2,8\div 3)$  МПа можно сократить потребность в кислороде на  $(30\div 35)\%$ . Кроме того, одновременно возрастает производительность газогенератора (пропорционально давлению) и повышается КПД газификации.

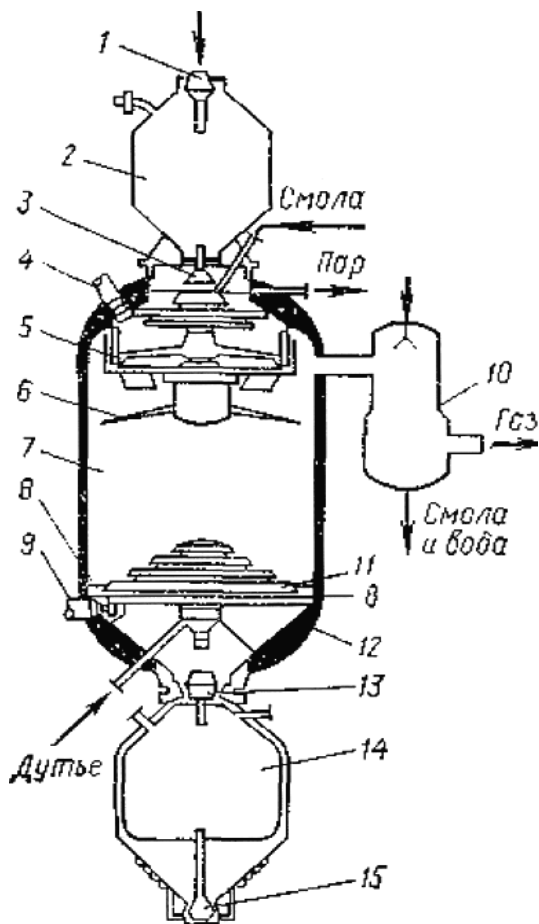


1 – чаша; 2 – колосниковая решетка; 3 – зона газификации; 4 – шпельшахта; 5 – топка; 6 – горелка; 7 – дюзы; 8 – футеровка; 9 – газослив; 10 – загрузочное устройство; 11 – шуровочное отверстие; 12 – привод; 13 – каток; 14 – шлакоприемник

Рис.3. Газогенератор для переработки сланцев

В газогенераторе Lurgi (рис. 4) исходный уголь (размер частиц  $(5\div 30)$  мм) из бункера 2 периодически загружают в шахту 7

газогенератора, снабженную водяной рубашкой 12.



1, 3, 13, 15 – затворы; 2, 14 – бункеры; 4, 9 – приводы; 5 – распределитель угля; 6 – перемешивающее устройство; 7 – шахта; 8 – ножи; 10 – скруббер; 11 – колосниковая решетка; 12 – водяная рубашка

Рис.4. Газогенератор Lurgi:

При помощи охлаждаемого вращающегося распределителя 5



и перемешивающего устройства 6 топливо равномерно распределяется по сечению аппарата Парокислородное дутье подают под вращающуюся колосниковую решетку 11, на которой находится слой золы, способствующий равномерному распределению газифицирующего агента. При вращении колосниковой решетки избыточное количество золы с помощью ножей 8 сбрасывают в бункер 14. Образующийся в аппарате газ проходит скруббер 10, где предварительно очищается от угольной пыли и смолы (в случае необходимости смолу можно вернуть в шахту газогенератора). Вращение распределителя 5 и колосниковой решетки 11 осуществляется от приводов 4 и 9. В шахте газогенератора поддерживают давление  $\sim 3$  МПа, поэтому, чтобы обеспечить безопасную загрузку топлива и выгрузку золы, каждый из бункеров 2 и 14 снабжают двумя конусообразными затворами (1, 3, 13 и 15).

При загрузке топлива в бункер 2 затвор 1 открыт, а затвор 3 закрыт. Для передачи топлива в шахту затвор 1 закрывают, по обводной газовой линии соединяют бункер с шахтой газогенератора (для выравнивания давления) и открывают затвор 3. Перед следующей загрузкой топлива в бункер 2 закрывают затвор 3, сбрасывают газ в линию низкого давления, продувают бункер азотом или водяным паром, а затем открывают затвор 1. Аналогично осуществляют выгрузку золы из бункера 14. Типичный газогенератор Lurgi имеет диаметр (4÷5) м., высоту (7÷8) м (без бункеров) и производительность по углю (600÷1000) т в сутки. Наряду с отмеченными выше достоинствами метода Lurgi следует указать, что в этом процессе приходится компримировать кислород, а не конечный газ, что значительно проще в технологическом отношении.

Недостатки метода Lurgi:

- жесткие ограничения по размерам частиц – не менее 5 мм (так как при большом содержании мелочи снижается производительность аппарата);
- наряду с газификацией происходит термическое разложение топлива с образованием продуктов полукоксования, которые необходимо извлекать из газа и перерабатывать;
- низкая степень разложения водяного пара (30÷40)%, вследствие чего остальное его количество при охлаждении газа конденсируется с образованием химически загрязненной

воды, требующей тщательной очистки.

## **2. Вопросы для самостоятельной работы**

1. Из чего состоит общая влага угля?
2. Какую влагу называют гигроскопической?
3. При какой температуре определяется влажность аналитической пробы угля?
4. На что влияет показатель влажности углей?
5. От чего зависит плотность углей?
6. Что такое зола и из чего она состоит?
7. В чем отличие летучей золы от провала?
8. Что такое шлак?
9. Дайте характеристику первичным, вторичным и третичным минеральным примесям ископаемых углей.
10. Назовите основные составляющие минеральной части углей.

## **3. Литература для самостоятельного изучения**

1. *Савченков А.А.* Первичная переработка нефти и газа: учебное пособие / А.А. Савченков. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2014. – 128с;
2. *Ахметов С.А.* Технология глубокой переработки нефти и газа: учебное пособие / С.А. Ахметов. – Уфа: Гилем, 2002. – 672с;
3. *Трушкова Л.В.* Нефтегазовый комплекс: методические указания для подготовки и повышения квалификации рабочих по профессии «Лаборант химического анализа» / Л.В. Трушкова. – Тюмень: Издательский центр БИК ТюмГНГУ, 2013. – 45с;
4. *Бойко Е.В.* Химия нефти и топлив: учебное пособие / Е.В. Бойко. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 60с;
5. *Гаврилов С.В.* Судовые котельные и паропроизводительные установки. Методические указания у практическим занятиям для курсантов специальности 240500 «Эксплуатация судовых энергетических установок» / С.В. Гаврилов. – Петропавловск – Камчатский: КамчайГТУ, 2005. – 106 с;

## ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

**Задание 1.** Сушка березовского угля с составом рабочей массы:  $W^p = 33,0\%$ ;  $A^p = 4,7\%$ ;  $C^p = 44,3\%$ ;  $H^p = 3,0\%$ ;  $O^p = 14,4\%$ ;  $N^p = 0,4\%$ ;  $S_{л}^p = 0,2\%$ . Определите состав рабочей массы подсушенного до  $W^p = 10,0\%$  топлива.

**Задание 2.** Содержание углерода в рабочей массе экибастузского угля составляет  $43,4\%$  при влажности рабочей массы  $7,0\%$  и зольности  $38,1\%$ . Определите содержание углерода в сухой массе при увеличении рабочей зольности топлива до  $45,0\%$ .

**Задание 3.** Определите состав горючей массы нерюнгринского угля, если известен состав рабочей массы:  $W^p = 9,5\%$ ;  $A^p = 12,7\%$ ;  $C^p = 66,1\%$ ;  $H^p = 3,3\%$ ;  $O^p = 7,5\%$ ;  $N^p = 0,7\%$ ;  $S_{л}^p = 0,2\%$ .

**Задание 4.** Определите рабочий состав эстонских сланцев, если известен элементный состав горючей массы:  $C^r = 72,13\%$ ;  $H^r = 10,16\%$ ;  $O^r = 12,13\%$ ;  $N^r = 0,33\%$ ;  $S_{л}^r = 5,25\%$ . Рабочая масса имеет:  $W^p = 13,0\%$ ;  $A^p = 40,0\%$ ;  $(CO_2)^p_k = 16,5\%$ .

**Задание 5.** Определите состав рабочей массы челябинского угля марки 3Б, если состав его горючей массы:  $C^r = 71,0\%$ ;  $H^r = 5,3\%$ ;  $O^r = 20,1\%$ ;  $N^r = 1,9\%$ ;  $S_{л}^r = 1,7\%$ . Зольность сухой массы топлива  $43,0\%$ , а влажность угля на рабочую массу  $17,0\%$ .

**Задание 6.** Определите состав рабочей массы ленинградских горючих сланцев, если состав их горючей массы следующий: углерод –  $74,0$ , водород –  $9,5$ , сера –  $6,1$ , азот –  $0,4$ , кислород –  $10,0\%$  ( $W^p = 11,5\%$ ;  $A^p = 46,0\%$ ;  $(CO_2)^p_k = 16,4\%$ ).

**Задание 7.** Определить состав горючей массы кизеловского угля марки Г, если состав его рабочей массы:  $C^p = 48,5\%$ ;  $H^p = 3,6\%$ ;  $S_{л}^p = 6,1\%$ ;  $N^p = 0,8\%$ ;  $O^p = 4,0\%$ ; зольность сухой массы  $A^c = 33,0\%$  и влажность рабочая  $W^p = 6,0\%$ .

**Задание 8.** Определить состав рабочей массы угля марки БЗ, если состав его горючей массы:  $C^r = 71,1\%$ ;  $H^r = 5,3\%$ ;  $S_{л}^r = 1,9\%$ ;  $N^r = 1,7\%$ ;  $O^r = 20,0\%$ ; зольность сухой массы  $A^c = 36\%$  и влажность рабочая  $W^p = 18,0\%$ .

**Задание 9.** Определить состав рабочей массы угля марки Д, если состав его горючей массы:  $C^r = 78,5\%$ ;  $H^r = 5,6\%$ ;  $S_{л}^r = 0,4\%$ ;  $N^r = 2,5\%$ ;  $O^r = 13,0\%$ ; зольность сухой массы  $A^c = 15,0\%$  и влажность рабочая  $W^p = 12,0\%$ .

**Задание 10.** В мельнице-вентиляторе подсушивается уголь марки Б2 состава:  $C^p_1 = 28,7\%$ ;  $H^p_1 = 2,2\%$ ;  $S^p_1 = 2,7\%$ ;  $N^p_1 = 0,6\%$ ;  $O^p_1 = 8,6\%$ ;  $A^p_1 = 25,2\%$  и  $W^p_1 = 32\%$ . Определить состав рабочей массы подсушенного топлива, если известно, что влажность топлива после подсушки  $W^p_2 = 15,0\%$ .

**Задание 11** Был получен элементный состав бурого угля марки на горючую массу:  $C^r = 80,0\%$ ;  $H^r = 6,5\%$ ;  $O^r = 11,0\%$ ;  $N^r = 2,0\%$ ;  $S^r = 0,5\%$ . Влажность и зольность на рабочую массу равны  $W^p = 12,0\%$  и  $A^p = 11,4\%$ . Определить элементный состав на рабочую массу топлива.

**Задание 12.** Проверить правильность определения элементного состава топлива, если известны данные лабораторных исследований:  $C^c = 62,17\%$ ;  $H^c = 4,10\%$ ;  $O^c = 5,17\%$ ;  $N^c = 1,29\%$ ;  $S^c = 3,27\%$ ,  $W^p = 7,90\%$ ;  $A^p = 22,10\%$  и  $Q^p_n = 22\,776$  кДж/кг.

**Задание 13.** При открытом способе добычи угля прошло увеличение его зольности с  $38,1\%$  до  $48,0\%$  в рабочей массе и влажности с  $7,0\%$  до  $11,0\%$ . Определите насколько изменится низшая теплота сгорания угля, если ее исходное значение составляло  $Q^p_n = 16\,747$  кДж/кг.

**Задание 14.** Определить теплоту сгорания смеси твердого топлива с низшей теплотой сгорания  $Q^p_{n1} = 13\,020$  кДж/кг и мазута с  $Q^p_{n2} = 38\,800$  кДж/кг при тепловой доле твердого топлива в смеси  $q=0,30$ .

**Задание 15.** На ТЭЦ сжигается доменный газ и мазут. Доля тепловыделения доменного газа  $q = 0,6$ . Определите количество газа на  $1$  кг мазута и теплоту сгорания смеси на  $1$  кг мазута. Мазут имеет  $Q^p_{n1} = 38\,870$  кДж/кг, а доменный газ  $Q^p_{n2} = 3710$  кДж/кг.

**Задание 16.** Определите количество и состав дымовых газов, расход воздуха необходимый на горение природного газа для достижения температуры  $T_n = 1100$  °С и составьте материальный баланс процесса. Состав и характеристика природного газа представлены в таблице 1. Начальная температура воздуха  $10$  °С, начальная температура природного газа –  $10$  °С. Влажность воздуха  $15$  г на  $1$  кг сухого воздуха. Теплоемкость воздуха по

объему  $1,3 \text{ кДж/м}^3\text{°C}$ . Теплоемкость природного газа –  $1,7 \text{ кДж/м}^3\text{°C}$ . Калориметрический коэффициент печи, в которой происходит процесс горения, равен  $0,7$ .

Таблица 1

**Состав и характеристика природного газа различных месторождений**

№	Состав газа по объему, %								$Q_{н.р}$ , кДж/м <sup>3</sup>
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>15</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	
1	94,9	2,3	0,7	0,4	0,8	0,2	0,5	0,2	38000,0
2	93,0	2,1	0,8	0,4	0,3	0,3	2,7	0,4	36500,0
3	86,9	6,0	1,6	1,0	0,5	1,2	2,8	нет	38600,0
4	93,0	3,1	0,7	0,6	Нет	0,1	2,5	нет	36900,0
5	95,0	1,1	0,3	0,1	0,3	0,4	3,0	0,1	35400,0

**Задание 17.** Определите количество и состав дымовых газов, расход воздуха необходимый на горение мазута для достижения температуры  $T_{п} = 1100 \text{ °C}$  и составьте материальный баланс процесса. Состав и характеристика мазута представлены в таблице 2. Дополнительно известно, что 25 % углерода сгорает до CO, остальные 75 % до CO<sub>2</sub>, сера полностью сгорает до SO<sub>2</sub> и затем, 30 % образующегося SO<sub>2</sub> сгорает до SO<sub>3</sub> используя кислород воздуха, который поступает на горение. Начальная температура воздуха  $100 \text{ °C}$ , начальная температура мазута –  $100 \text{ °C}$ . Влагосодержание воздуха 15 г на 1 кг сухого воздуха. Теплоемкость воздуха по массе  $1,005 \text{ кДж/кг°С}$ . Калориметрический коэффициент печи, в которой происходит процесс горения, равен  $0,9$ .

Таблица 2

**Состав и характеристика мазута**

№	Мазут	W, %	A, %	Состав, % мас.					$Q_{н.р}$ , кДж/кг
				S	C	H	N	O	
1	Низко-сернистый	0,15	0,03	0,39	87,18	11,87	0,10	0,10	41680,0
2	Мало-сернистый	0,20	0,03	0,85	86,38	12,04	0,10	0,20	40530,0
3	Сернистый	0,49	0,05	1,80	85,22	11,40	0,20	0,30	39570,0

Необходимо учесть, что теплоемкость топлива рассчитывается по следующему уравнению:

$$C_m = 1,74 + 0,00252t_m.$$

Для проектных расчетов объемной теплоемкости продуктов горения (кДж/кг<sup>o</sup>C) допустимо пользоваться приближенной формулой:

$$C_o = 1,05 + 0,00006t_o.$$

**Задание 18.** Определите количество и состав дымовых газов, расход воздуха необходимый на горение угля для достижения температуры  $T_{п} = 1200^{\circ}\text{C}$  и составьте материальный баланс процесса. Состав и характеристика угля представлены в таблице 3. Дополнительно известно, что 45 % углерода сгорает до CO, остальные 55 % до CO<sub>2</sub>, сера на 20 % сгорает до SO<sub>2</sub>, а остальное до SO<sub>3</sub>. Начальная температура воздуха 10 °C, начальная температура угля – 10 °C. Влажосодержание воздуха 20 г на 1 кг сухого воздуха. Теплоемкость воздуха по массе 1,005 кДж/кг<sup>o</sup>C. Калориметрический коэффициент печи, в которой происходит процесс горения, равен 0,7.

Таблица 3

**Состав и характеристика угля**

№	W, %	A, %	Состав, % мас.					Q <sub>н</sub> <sup>p</sup> , кДж/кг
			S	C	H	N	O	
1	10,00	16,00	5,20	80,00	5,50	1,80	7,50	33280,00
2	9,00	18,00	3,20	84,00	5,00	1,70	6,10	35380,00
3	12,00	17,00	3,00	87,00	5,00	1,50	3,50	35380,00
4	10,00	18,00	2,70	88,00	4,80	1,50	3,00	36000,00
5	11,00	19,00	2,50	89,00	4,50	1,50	2,50	36000,00

Для проектных расчетов объемной теплоемкости продуктов горения (кДж/кг<sup>o</sup>C) допустимо пользоваться приближенной формулой:

$$C_o = 1,05 + 0,00006t_o.$$

## РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кузнецов Б.Н.* Глубокая переработка бурых углей с получением жидких топлив и углеродных материалов /Б.Н. Кузнецов., Т.Г. Шендрик, М.Л. Щипко. – Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2012. – 212 с.
2. *Филоненко Ю.Я.* Теоретические основы технологии коксования каменных углей: учебное пособие/Ю.Я. Филоненко, А.А. Кауфман, В.Ю. Филоненко. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2015. – 191 с.
3. *Иванова И.В.* Теория горения топлива. Технический анализ твердого топлива: учебное пособие / И.В. Иванова, А.Ф. Смоляков, И.Н. Дюкова, А.А. Куликов. –Санкт-Петербург : СПбГЛТУ, 2016. – 32 с.
4. *Михайловский В.П.* Расчеты горения топлива, температурных полей и тепловых установок технологи бетонных и железобетонных изделий: учебное пособие / В.П. Михайловский, Э.Н. Мартемьянова, В.В. Ушаков. – Омск: СибАДИ, 2011. – 262 с.
5. *Сардашвили А.Г.* Примеры и задачи по технологии переработки нефти и газа / А.Г. Сардашвили, А.И. Львова. – М., Химия, 1980. – 256 с.
6. *Моисеев А.В.* Расчетные методы определения физико – химических свойств углеводородных систем, нефтей и нефтепродуктов: Примеры и задачи: учебное пособие / А.В. Моисеев. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2010. – 179 с.
7. *Савченков А.А.* Первичная переработка нефти и газа: учебное пособие / А.А. Савченков. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2014. – 128 с.
8. *Ахметов С.А.* Технология глубокой переработки нефти и газа: учебное пособие / С.А. Ахметов. – Уфа: Гилем, 2002. – 672 с.
9. *Трушкова Л.В.* Нефтегазовый комплекс: методические указания для подготовки и повышения квалификации рабочих по профессии «Лаборант химического анализа» / Л.В. Трушкова. – Тюмень: Издательский центр БИК ТюмГНГУ, 2013. – 45 с.
10. *Бойко Е.В.* Химия нефти и топлив: учебное пособие / Е.В. Бойко. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 60 с.
11. *Гаврилов С.В.* Судовые котельные и паропроизводительные установки. Методические указания у практическим занятиям для курсантов специальности 240500 «Эксплуатация судовых энергетических установок» / С.В. Гаврилов. – Петропавловск – Камчатский: КамчайГТУ, 2005. – 106 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

1	Введение.....	3
2	Самостоятельная работа №1. Уголь и горючие сланцы: основные месторождения, свойства и состав .....	4
3	Самостоятельная работа №2. Процессы предварительной подготовки углей и горючих сланцев к термической переработке .....	12
4	Самостоятельная работа №3. Основные процессы термической переработки углей и горючих сланцев .....	17
5	Самостоятельная работа №4. Газификация углей: агрегаты и основные параметры процесса .....	22
6	Самостоятельная работа №5. Получение искусственных газов газификацией углей и горючих сланцев .....	30
7	Задачи для самостоятельной работы .....	42
8	Рекомендуемый библиографический список .....	46



# **ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УГЛЕЙ И ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ**

*Методические указания к самостоятельной работе  
для студентов бакалавриата направления 18.03.01*

Сост.: *М.Ю. Назаренко, С.Н. Салтыкова*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой  
химических технологий и переработки энергоносителей

Ответственный за выпуск *М.Ю. Назаренко*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 24.05.2021. Формат 60×84/16.  
Усл. печ. л. 2,7. Усл.кр.-отг. 2,7. Уч.-изд.л. 2,5. Тираж 75 экз. Заказ 434.

Санкт-Петербургский горный университет  
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета  
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2