

Федеральное агентство по образованию
ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ»



А.А. Кауфман, В.Д. Глянченко, С.А. Косогоров

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА СОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ КОКСОВАНИЯ

СБОРНИК ПРИМЕРОВ И ЗАДАЧ

Учебное электронное текстовое издание
Подготовлено кафедрой «Химические технологии топлива и промышленной экологии»
Научный редактор: доц., канд. техн. наук Ф.С. Югай

Методическое пособие для студентов дневной (заочной) формы обучения направления 655000, специальности 250400 – Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов

Приведены общие сведения о природных энергоносителях – горючих ископаемых. Даны краткая классификация процессов их термической переработки, необходимые сведения по подготовке углей к коксованию, сущность процесса коксования, обзор конструкций и основы эксплуатации коксовых печей. Задачи по технологии подготовки углей для коксового производства, технологии коксования и примеры их решения должны использоваться в процессе проведения практических занятий, при выдаче заданий по курсовым работам и курсовым проектам.

© ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2005

Екатеринбург
2005

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Раздел I. Классификация процессов термической переработки природных энергоносителей – горючих ископаемых	4
1.1. Общие сведения о горючих ископаемых	4
1.2. Процессы термической переработки горючих ископаемых	6
Раздел II. Коксование	8
2.1. Сырьевая база коксования. Подготовка углей. Запасы каменных углей	8
2.1.1. Свойства углей, используемых для коксования, и принципы составления шихты	11
2.1.2. Технологические схемы углеподготовки	13
Примеры задач	17
2.2. Сущность процесса коксования	17
2.3. Коксовые печи	19
2.3.1. Классификация коксовых печей	20
2.3.2. Размеры, производительность и срок службы коксовых печей	21
2.3.3. Обогрев коксовых печей	25
2.3.4. Гидравлический режим коксовых печей	32
2.3.5. Эксплуатация коксовых печей	34
Раздел III. Примеры решения	37
Библиографический список	48
Приложение	49

Введение

Сборник задач и методические указания предназначены для закрепления знаний студентов специальности 250400 «Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов», прослушавших курсы «Введение в специальность», «Физика и химия горючих ископаемых», «Теоретические основы технологии топлива и углеродных материалов», «Процессы и аппараты химической технологии».

Задачи составлены применительно ко всем основным разделам технологии коксохимического производства: обогащению углей, составлению угольных смесей (шихты) для оптимального использования сырьевой базы коксования, эксплуатации коксовых печей с целью обеспечения максимального срока их службы и получения максимального выхода и качества целевых продуктов – главным образом металлургического кокса.

При составлении задач учитывались особенности работы современной коксохимической промышленности России, которые в значительной степени отличаются от условий, существовавших в СССР.

В период 1990–2005 гг. ухудшилась сырьевая база коксования, произошли значительные изменения состояния печного фонда коксохимических заводов и коксохимических производств металлургических комбинатов. Эксплуатируются коксовые батареи со сроком службы от 2 до 40 лет. Имеет место большая разнокалиберность коксового и углеподготовительного оборудования.

Изменились терминология, наименования физических, химических, теплотехнических величин, характеризующих угли и получаемые из них товарные продукты. Изменились ГОСТЫ, ТУ и методы контроля качества сырья и продукции.

Все это явилось основанием для пересмотра учебных рабочих программ по указанным выше дисциплинам. Естественно все это должно было найти отражение в настоящем сборнике задач, который составлен в полном соответствии с программой курса «Теория и практика современных методов производства кокса».

Раздел I. Классификация процессов термической переработки природных энергоносителей – горючих ископаемых

1.1. Общие сведения о горючих ископаемых

Твердое топливо. Твердым топливом естественного происхождения являются торф, бурый и каменный угли, антрацит, горючие сланцы.

К искусственным видам твердого топлива относятся торфяной кокс, полукокс и кокс из бурых и каменных углей, термоантрацит, полученные пирогенетической переработкой натурального твердого топлива, а также брикеты, угольная пыль, полученные механической переработкой твердого топлива.

Жидкое топливо. Сырьем естественного происхождения для получения моторного, котельного и других видов топлив (бензина, керосина, дизельного топлива, мазута и др.) является нефть. Искусственное жидкое топливо получают гидрогенизацией твердых горючих ископаемых, смол, тяжелых остатков перегонки нефти и синтезом Фишера–Тропша.

Газообразное топливо. Газообразным топливом естественного происхождения являются природный и попутные газы нефтедобычи.

К искусственным видам газообразного топлива относятся: газы пиролиза и крекинга нефтяных продуктов, газы низко- и высокотемпературного коксования, получаемые любой пирогенетической переработкой твердого топлива; генераторный, водяной, полуводяной газы, получаемые газификацией твердого топлива; доменный газ.

Эти сведения дают общие представления о различных видах топлива. Сведения о современных обозначениях качественных характеристик твердого топлива приведены в приложении (таблица 1).

Результаты элементного и технического анализов могут характеризовать органическую, горючую, сухую, а также рабочую массу твердого топлива. Состав топлива* можно представить уравнениями:

$$\text{Твердое топливо} = \text{органическая масса} + \text{минеральные вещества} + \text{влага.} \quad (1)$$

* При определении элементного состава и других показателей применяется индекс «daf» для органической массы, «d» – для сухой, «г» – для рабочей.

$$C^r + H^r + O^r + N^r + S_{OB}^r + A^r + (CO_2)^r + W_t^r = 100\%, \quad (2)$$

где $C^r, H^r, O^r, N^r, S_{OB}^r$ – содержание элементов в топливе на рабочую массу; $(CO_2)^r$ – количество диоксида углерода в карбонате пробы; W_t^r – содержание влаги в топливе; A^r – зольность на рабочую массу.

Содержание карбонатов в минеральной части каменных углей незначительно, поэтому $(\text{CO}_2)_\text{к}$ учитывается при расчетах элементного и технического составов, если его содержание в углях $\geq 2\%$. Особенно высоко содержание карбонатов в сланцах ($> 10\%$). При определении количества углерода в топливе необходимо знать точное содержание $(\text{CO}_2)^\text{т}$ и вносить соответствующие поправки.

Минеральная часть углей состоит из следующих групп соединений: 1) алюмосиликатов, составляющих $\sim 75\%$ всех минеральных примесей; 2) карбонатов; 3) хлоридов; 4) соединений серы: сульфидов (колчедан, марказит) и сульфатов.

При использовании углей в различных технологических процессах минеральная часть играет существенную роль. Так, одни элементы (сера, хлор, фосфор и др.) снижают, другие (углерод, германий) повышают ценность угля.

При определении зольности минеральные компоненты подвергаются различным превращениям, поэтому для подсчета истинного количества минеральных веществ предложен ряд формул, например:

$$A_1^d = A^d + \frac{5}{8} S_\text{с} + (\text{SO}_3)_\text{с} - (\text{SO}_3)_\text{А} A^d + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2, \quad (3)$$

где A_1^d – истинное содержание минеральной части угля, %; A^d – зольность на сухое вещество, определенная стандартным методом, %; $S_\text{с}$ – содержание колчеданной серы в угле, %; $(\text{SO}_3)_\text{с}$ – SO_3 в сульфатах угля, %; $(\text{SO}_3)_\text{А} A^d$ – SO_3 в сульфатах золы, %; H_2O – конституционная влага минеральных веществ, %; CO_2 – содержание диоксида углерода в карбонатах.

Для характеристики качества топлива на практике твердые горючие ископаемые анализируют на влажность, зольность, содержание серы (общей и по видам), диоксида углерода карбонатов, определяют элементный состав и выход летучих веществ. Для анализа используют аналитическую пробу. Пересчет результатов на рабочее топливо, сухую, горючую и органическую массу компонентов топлива производят по известным формулам. В таблице 2, 3 (см. приложение) представлены коэффициенты для пересчета компонентов с одной массы на другую. При отсутствии данных о содержании в пробе колчеданной серы при расчете результатов анализа на органическую массу или пересчете с органической массы на другую следует подставлять в формулы $S_\text{об}$. При расчете выхода летучих веществ из горючих сланцев необходимо учитывать неразложившиеся карбонаты:

$$V^a = \sum V - W^a - (\text{CO}_2)_{\text{г}}^a + (\text{CO}_2)_{\text{г}}^k, \quad (4)$$

где $\sum V$ – суммарная потеря массы при определении выхода летучих веществ в горючем сланце, %; W^a – количество влаги в аналитической пробе, %; $(\text{CO}_2)_{\text{г}}^a$ – содержание диоксида углерода карбонатов в аналитической пробе, %; $(\text{CO}_2)_{\text{г}}^k$ – содержание диоксида углерода карбонатов в коксовом остатке, отнесенное к аналитической пробе сланца, %.

1.2. Процессы термической переработки горючих ископаемых

Термическая (пирогенетическая, т. е. без доступа воздуха) переработка твердых горючих ископаемых производится в промышленности при различных температурах в зависимости от назначения процесса. В промышленной практике получили распространение процессы: полукоксование, среднетемпературное коксование, высокотемпературное коксование и деструктивная гидрогенизация.

Для процесса полукоксования характерна конечная температура 500–550 °С. Полукоксование применяют для получения полукокса и жидких продуктов.

Под среднетемпературным коксованием понимают процесс термической переработки топлива при 700 °С. Этот процесс не получил широкого распространения. В России его нет.

Наибольшее значение для российской промышленности по своим масштабам, разнообразию и ценности получаемых продуктов имеет коксование (конечная температура 1000–1050 °С), являющееся основным процессом химической переработки твердого топлива. В России коксованием перерабатывается до 60 млн т углей.

Указанные методы различаются не только по температурам, но и в большинстве случаев по виду и составу перерабатываемого сырья и конечной цели процесса. Так, основной целью полукоксования является получение полукокса и первичной (полукоксовой) смолы. Выход и состав полукоксовой смолы определяется типом горючего ископаемого. Полукоккс (твердый остаток) используется в качестве бездымного топлива, а также, измельченный до определенного уровня, может служить отошующей добавкой к шихте для коксования.

Среднетемпературное коксование, как самостоятельный процесс, начало применяться в пятидесятые годы XIX в. Основным назначением этого процесса является получение бездымного топлива и углеродистого восстановителя при плавке цветных металлов и ферросплавов.

При термической переработке горючих ископаемых без доступа воздуха температура существенно влияет на выход и химический состав смолы и газа. При повышении температуры характерным для смолы является снижение содержания многоатомных фенолов, нафтенных и нафтенно–ароматических углеводородов почти до нуля при одновременном увеличении в смоле ароматических углеводородов. Нафталин и одноатомные фенолы начинают появляться в смоле при средних температурах коксования, выход аммиака при этом максимальный.

Необходимо подчеркнуть, что при термическом разложении топлива выход смолы (при одной и той же температуре процесса) зависит прежде всего от содержания в нем водорода. Например, при полукоксовании сапропелитовых углей и сланцев, в органической массе которых содержится больше водорода, чем в гумусовых углях, получают наиболее высокие выходы смолы.

Химический состав смол полукоксования значительно различается и определяется природой горючего ископаемого. При высокотемпературной переработке их состав нивелируется.

Особое место среди химических процессов переработки твердых топлив занимает процесс деструктивной гидрогенизации как по своему назначению, так и по технологическому оформлению. Основной целью процесса является получение искусственного жидкого топлива. Процесс осуществляется при высоком (более 100 атм) давлении водорода и повышенных (более 300 С) температурах в присутствии катализатора.

В предвоенные годы и до конца второй мировой войны характерным было промышленное использование процессов деструктивной гидрогенизации смол различного происхождения и углей. Это был период наибольшего их развития. Так, в Германии 30-х гг. XX в. производство жидкого топлива гидрогенизацией угля достигало 400 тыс. т/год и синтезом Фишера–Тропша – 100 тыс. т/год. В 60–80-х гг. работали заводы по производству искусственного жидкого топлива (более 3 млн т в год) (ИЖТ) в ЮАР.

В настоящее время искусственное жидкое топливо в несколько раз дороже получаемого переработкой нефти.

В России и ряде других стран ведут интенсивные разработки дешевых и эффективных катализаторов, позволяющих снизить температуру и давление процесса, для гидрогенизации угля совместно с тяжелыми остатками нефти.

Для получения газов с высокой теплотой сгорания, а также газов для синтеза в настоящее время сохраняют значение способы газификации угля Винклера, Лурги и Копперс–Тотцека.

Раздел II. Коксование

При коксовании каменных углей получают кокс, коксовый газ, смолу, сырой бензол, аммиак, пирогенетическую воду. Основным продуктом является кокс, 80% которого идет в доменные печи для выплавки чугуна. Большое значение для многих отраслей промышленности могут иметь также химические продукты коксования, ассортимент которых в настоящее время составляет более 175 наименований (340 сортов).

Более 70 отраслей и подотраслей народного хозяйства могут использовать продукты переработки смолы, сырого бензола, сырых пиридиновых оснований, сырых фенолов, а также коксовый газ. Следует отметить, что в результате успешного развития химии органического синтеза многие химические продукты коксования уже не имеют сбыта и, например, аммиак и сырой бензол выгоднее сжигать, чем производить из них какие-либо продукты.

Материальный баланс коксования зависит от многих факторов, но в общем может выглядеть следующим образом, масс. %:

кокс	76–78,5
смола	3,2–3,5
газ	13–15
сырой бензол	0,8–1,2
аммиак	0,25–0,35
пирогенетическая влага	2,5–3,5

В материальном балансе коксования химические продукты составляют небольшую часть, в общей же стоимости товарной продукции коксохимической промышленности доля их достигала 16%.

Выход коксового газа составляет 340–350 нм³/т сухой шихты. Он содержит до 61% водорода и до 25% метана, имеет высокую теплоту сгорания и широко используется в металлургической промышленности и в коксохимическом производстве главным образом для обогрева коксовых печей.

2.1. Сырьевая база коксования. Подготовка углей.

Запасы каменных углей

Для производства металлургического кокса применяют каменные угли определенного типа – средней степени метаморфизма, обладающие рядом специфических свойств, присущих только спекающимся и коксующимся углям.

В настоящее время до 60% общей добычи угля расходуется для получения электроэнергии, до 25% – для производства кокса, остальной уголь используется в коммунально-бытовом хозяйстве и прочими потребителями.

Коксохимическая промышленность России обеспечивается углями Кузнецкого, Печорского бассейнов и месторождений Якутии. Очень небольшое количество может поступать из Карагандинского угольного бассейна (Казахстан).

Геологические запасы кондиционных коксующихся углей СНГ, подсчитываемые по расположению до глубины 1800 м, оценивались в 577 млрд т, что составляло 61,4% мировых запасов. Более половины этих запасов приходится на неосвоенные угольные бассейны, расположенные в восточных районах России.

Рядовые угли перед коксованием подвергают обогащению. Цель обогащения состоит в получении углей, пригодных для коксования с определенными и равномерными влажностью, зольностью и содержанием серы.

Спекаемость и коксуемость угля (шихты) улучшаются при обогащении вследствие как уменьшения зольности, так и увеличения удельного содержания хорошо спекающихся петрографических составляющих – витрена и кларена.

Все стадии процесса обработки угля при обогащении могут быть объединены в следующие три группы:

1) подготовительные процессы, при которых изменяется состав рядового угля по крупности и разрушаются сродки угля с породой (дробление и измельчение, грохочение, т. е. классификация по крупности, и обеспыливание, т. е. удаление класса крупности $< 0,5$ мм);

2) основные процессы, при которых происходит выделение из угля концентрата, промежуточного продукта, породы (обогащение угля в отсадочных машинах, в тяжелых суспензиях, флотация пыли и шлама и другие методы обогащения);

3) вспомогательные процессы, к которым относятся обезвоживание угля, сгущение шлама, осветление воды, складирование угля.

Наиболее широко применяют так называемые гравитационные методы разделения угля и породы по их плотности в водной (мокрое обогащение) или в воздушной (сухое обогащение) средах. Так, например, легкая фракция (концентрат), в которой наибольшее содержание угольного вещества, имеющая плотность приблизительно $1300\text{--}1400\text{ кг/м}^3$, выносится в верхние слои, а тяжелая в основном порода (плотность породы $2600\text{--}4000\text{ кг/м}^3$) скапливается в нижних слоях.

Флотационный метод обогащения основан на различной смачиваемости угля и породы водой и может быть применен для самых мелких классов (крупностью < 1 мм). Процесс очень дорогой и применяется, только, если зольность этого класса крупности $> 14\%$. В других случаях эти удаленные из шихты или угля-компонента класс крупности просто «присаживают» к шихте.

Расход рядового угля на 1 т концентрата составляет в среднем по Кузнецкому бассейну 1,290, по Карагандинскому – 1,911 и по Донецкому – 1,453 т.

Такая большая разница в выходе целевого продукта-концентрата объясняется различной обогатимостью углей.

Обогатимость – это большая или меньшая трудность отделения вещества угля от минеральных включений – породы. Определение обогатимости важнейшая характеристика, во многом определяющая технологию подготовки и даже использования углей.

Определение обогатимости – это один из первых анализов, которые производят при разведке угольных месторождений.

Обогатимость углей определяется путем расслойки пробы в тяжелых жидкостях, плотность которых больше единицы. При расслойке определяют соотношение легких – промежуточных – (плотность – $1400\text{--}1800 \text{ кг/м}^3$) и тяжелых (беспородная масса – плотность $> 1800 \text{ кг/м}^3$) фракций угольной пробы.

Обогатимость определяется по формуле:

$$T = \gamma_{\text{пр}} / (100 - \gamma_{\text{т}}) \cdot 100, \quad (5)$$

где $\gamma_{\text{пр}}$ – выход промежуточных фракций, $\gamma_{\text{т}}$ – выход тяжелых фракций. Из формулы видно, что степень обогатимости определяется в %, масс. По этому показателю различаются четыре категории обогатимости: первая категория (до 4%) – легкая; вторая (4–11%) – средняя; третья (11–17%) – трудная и четвертая ($> 17\%$) – очень трудная (сверхтрудная).

По приведенным выше данным по выходу концентрата из рядового угля видно, что кузнецкие угли легкообогатимые, у них наибольший выход концентрата на тонну угля, а карагандинские труднообогатимые, у них наименьший выход концентрата.

Производство кокса в мире в 2003 г. составило около 405 млн т. Средний удельный расход кокса на доменную плавку в разных странах колеблется в пределах 410–480 кг/т чугуна и зависит от многих факторов. Снижение расхода кокса достигается совершенствованием конструкций доменных печей, подготовкой железорудного сырья (содержание железа), вдуванием в доменную печь

угольной пыли, природного и коксового газов, при повышении температуры и давления дутья, а также увеличением содержания в нем кислорода и при других мероприятиях.

2.1.1. Свойства углей, используемых для коксования, и принципы составления шихты

К углям, используемым в процессе коксования для производства доменного и литейного коксов, предъявляется ряд требований. Смесь углей (шихта) должна обладать коксуемостью, иметь определенный в достаточно узких пределах выход летучих веществ, ограниченное содержание минеральных веществ, серы и в некоторых случаях – фосфора.

По М.В. Гофتمانу, факторы, определяющие коксуемость смеси углей, можно разделить на две группы. К первой группе относятся факторы, зависящие от природы угля: спекаемость, пластические свойства углей, газопроницаемость пластической массы, вспучивание и давление распираания, газовыделение в различные периоды коксования, усадка углей при коксовании. Некоторые из указанных свойств в какой-то степени, хотя и в меньшей, зависят от технологических условий коксования.

Ко второй группе относятся факторы, зависящие в основном от технологии подготовки шихты и процесса коксования: плотность насыпной массы шихты, степень измельчения, влажность, температура и скорость коксования.

Спекаемостью называют свойство угля при нагреве без доступа воздуха образовывать спекшийся монолит.

Коксуемостью называют свойство смеси углей образовывать доменный кокс в промышленных условиях коксования. Все коксующиеся угли обязательно спекаются, однако не все спекающиеся угли дают кокс, по качеству соответствующий доменному.

Основным свойством коксующихся углей является их способность переходить в пластическое состояние. Многие лабораторные способы определения спекаемости углей основаны на свойствах пластической массы (толщине пластического слоя, температурных интервалах, вязкости и др.).

В России применяют следующие методы определения спекаемости и коксуемости (ГОСТы на них пересматривались каждые 5 лет): 1) метод определения пластометрических показателей (ГОСТ 1186–69); 2) определение спекаемости (ГОСТ 9318–79); 3) ускоренный метод определения спекаемости (ГОСТ 2013–75); 4) определение коксуемости (ГОСТ 9521–74); 5) определение индекса свободного вспучивания (ГОСТ 20330–91); 6) определение типа кокса по

Грей–Кингу (ГОСТ 16126–91); 7) определение выхода жидкоподвижных продуктов из пластической массы угля (ГОСТ 17621–72); 8) dilatометрический анализ углей: метод ИГИ–ДМетИ (ГОСТ 14056–77); метод вспучивания Одибера–Арну (ГОСТ 13324–94).

Дилатометры предназначены для количественной оценки вспучивания и позволяют констатировать явление спекания.

Из альтернативных показателей, определяемых в лаборатории, наибольшее значение имеют толщина пластического слоя $У$ (мм), выход подвижной части пластической массы, выделяемой фильтрацией в центробежном поле $Ж_т$ (%), вспучивание $И_в$.

Шихту составляют из нескольких компонентов (групп, шахтогрупп), и многие ее свойства не являются аддитивной величиной (толщина пластического слоя, выход жидкоподвижных продуктов в центробежном поле, кажущаяся вязкость, газопроницаемость, вспучиваемость и др.).

Угольные шихты коксохимических предприятий в пластическом состоянии характеризуются в основном следующими показателями: индексом вспучивания (ИГИ–ДМетИ) 12–39 мм; толщиной пластического слоя 14–17 мм; индексом Рога (RI) 50–65.

Между спекаемостью и показателями свойств металлургического кокса нет прямой и однозначной связи. Поэтому ни один из методов определения спекаемости не может самостоятельно служить для прогноза качества кокса в широком диапазоне его свойств. Все лабораторные методы пока еще являются прогнозирующими в оценке коксующих свойств углей или шихт, однако они не позволяют перейти непосредственно к промышленному коксованию. Поэтому при подборе угольных шихт для новых коксохимических заводов, особенно при проектировании коксохимических предприятий для зарубежных стран, а также при значительных изменениях состава шихт действующих заводов приходится пользоваться методами ящичного коксования, полупромышленных и опытных промышленных коксований. Последние дают наиболее надежные и достоверные данные.

Таким образом, при составлении шихты предусматривают получение кокса, имеющего определенные физико-химические свойства и технический состав (содержание минеральных веществ, серы и т. д.), следят за тем, чтобы угольная смесь обеспечивала необходимую полноту спекания, а в период перехода в пластическое состояние – достаточное, но не опасное для кладки коксовых печей давление распирающего, способствующее образованию хорошей структуры и кус-

коватости кокса. Наряду с этим стремятся обеспечить надлежащий выход газа и химических продуктов коксования. Соотношение в шихте углей отдельных технологических групп определяется как ресурсами, так и свойствами. Таким образом, состав угольных шихт подбирают на основании спекаемости и коксуемости отдельных компонентов, их взаимовлияния при коксовании в смесях, технического анализа, а также с учетом особенностей технологических свойств угольных смесей, например давления распираания, конечной усадки и т. п.

Отметим некоторые особенности поведения основных компонентов угольных шихт при коксовании.

Газовые угли снижают давление распираания и обеспечивают легкую выдачу коксового пирога из камер, обладают высоким химическим потенциалом. При самостоятельном коксовании газовые угли средней спекаемости ($y = 10-15$ мм) образуют мелкий «пальчиковый» кокс с относительно невысокой механической прочностью.

Жирные угли являются основным спекающим компонентом современных шихт и обеспечивают получение из смеси углей (шихты) хорошо спекшегося и проплавленного кокса с высокой механической прочностью. Жирные угли обладают высокой спекаемостью и способны принимать значительное количество отошающих добавок.

Коксовые угли в шихте обеспечивают нормальную структуру, высокую прочность и однородную кусковатость кокса. При самостоятельном коксовании из них можно получить крупный, равномерный по кусковатости, малотрещиноватый кокс с высоким сопротивлением дробящим и истирающим усилиям. Обладают повышенным давлением распираания.

Отощенные спекающиеся угли являются отошающим компонентом шихты, снижающим трещиноватость кокса, которая развивается жирными углями, поэтому тощие угли способствуют повышению крупности кокса. При самостоятельном коксовании дают слабоспекшийся кокс, имеющий повышенную истираемость.

2.1.2. Технологические схемы углеподготовки

Производственный процесс получения кокса и химических продуктов коксования современного коксохимического предприятия делится на четыре технологические стадии.

Первая стадия производства – подготовка углей к коксованию осуществляется в углеподготовительных цехах. Вначале уголь различных марок поступает

на склады завода, затем его дробят, обогащают, дозируют и усредняют на всех стадиях технологического передела для получения готовой угольной шихты. Угольную шихту можно обогащать, если она составлена из необогащенных углей. Готовая шихта направляется в угольные башни коксового цеха.

На второй стадии производства (собственно коксование углей) угольную шихту загружают в камеру коксования, в которой под действием высокой температуры без доступа воздуха шихта превращается в кокс, коксовый газ и химические продукты.

Третья стадия производства – выделение из коксового газа химических продуктов коксования осуществляется в химических цехах, отделениях. Коксовый газ после извлечения из него ценных химических веществ направляют по газопроводам потребителям или возвращают на обогрев коксовых батарей.

На четвертой стадии производства осуществляется переработка первичных продуктов коксования: каменноугольной смолы, сырого бензола, сырых пиридиновых оснований, фенолов и др.

Существует два типа коксохимических предприятий: 1) заводы с полным циклом коксохимического производства, строящиеся отдельно от металлургических предприятий; 2) коксохимические цеха (производства), входящие в состав металлургического завода (комбината) и строящиеся на одной площадке с ним.

Генеральным планом коксохимического завода предусматривается следующая схема горизонтальной планировки. Коксовый цех, как правило, располагается в центре заводской площадки, что обеспечивает четкое разграничение химических и углеподготовительных цехов. Химические цеха располагаются с машинной стороны коксовых печей, а углеподготовительный может располагаться с коксовой или с машинной стороны.

Подготовка угля к коксованию состоит из следующих основных стадий: обогащения, измельчения и составления шихты (шихтовки).

Шихтовкой называют процесс составления максимально однородной угольной смеси из различных по физическим и химическим свойствам горючей массы углей в строго установленной пропорции. Процесс шихтовки состоит из двух последовательных операций – дозирования и смешения.

В связи с ухудшением сырьевой базы и увеличением доли газовых углей в шихте качество кокса и постоянство его свойств в основном зависят, при прочих равных условиях, от оборудования и технологических схем углеподготовительных цехов.

Схема углеподготовки – это схема цепи аппаратов, в которых производятся различные процессы. Определяется схема местом расположения отделения окончательного измельчения шихты или отдельных ее компонентов.

В зависимости от свойств углей применяют измельчение (дробление) шихты – схема ДШ, измельчение отдельных компонентов – схема ДК, групповое дробление компонентов – ГДК, дифференцированное дробление компонентов – ДДК, избирательное дробление шихты или компонентов с пневмосепарацией – ИД.

Следует напомнить, что по определению комитета по терминологии еще АН СССР дробление определяется как уменьшение размеров материала до крупности более 5 мм, а измельчение – это уменьшение размеров материала до крупности менее 5 мм. В производстве и в технической литературе часто смешивают эти понятия, и старое наименование схем подготовки угольной шихты часто подразумевает понятие не дробления, а измельчения (например, название схемы – ДШ, ДК, ИД и пр.).

Выбор технологической схемы углеподготовки решается в зависимости от особенностей угольной сырьевой базы коксования. Например, на заводах Украины, работающих преимущественно с использованием углей Донецкого бассейна, подготовку шихты осуществляют преимущественно по схемам дробления компонентов (ДК), группового (ГДК) и дифференцированного (ДДК) дробления компонентов, позволяющим увеличить плотность шихты на 2–2,5% и улучшить показатели прочности кокса. Для петрографически неоднородных углей (сырьевая база России) предпочтителен процесс избирательного дробления шихты с пневмомеханической сепарацией; при этом значительно улучшаются качественные показатели металлургического кокса, и расширяется угольная сырьевая база.

Измельчение шихты позволяет улучшить ее коксуемость в результате повышения однородности дисперсной массы, что приводит к улучшению качества кокса. Однако значительное измельчение шихты может привести к отрицательным результатам. Поскольку плотность насыпной массы шихты зависит от степени ее измельчения, определяющей экономические показатели работы углеподготовительного и коксового цехов, то для шихт разного состава находят оптимальную степень измельчения.

При одной и той же степени измельчения, характеризуемой содержанием классов < 3 мм, различные способы подготовки шихты могут давать в конечном продукте различное содержание пыли (класс крупности $< 0,5$ мм).

При подготовке углей к коксованию необходимо достигать оптимального соотношения классов крупности в шихте для обеспечения более высокой плотности загрузки; избегать образования большого количества тонких классов, снижающих спекаемость углей. Крупные классы шихты по спекаемости, зольности и петрографическому составу не должны резко отличаться от остальных классов.

Способы измельчения углей характеризуются следующими отличительными признаками:

1. При обычном способе ДШ измельчают всю массу шихты. Более твердые компоненты будут иметь большую крупность, чем легко дробимые компоненты.

2. В случае дифференцированного измельчения (ДК, ДДК, ГДК) каждый компонент или некоторые из компонентов шихты измельчают до заданной степени. Этот способ обеспечивает регулирование степени измельчения компонентов шихты.

3. При избирательном измельчении помолу подвергают только крупные классы угля или шихты, при этом измельчение отдельных классов может осуществляться дифференцированно. Разделение на классы может производиться при помощи грохотов и центробежных отделителей или гравитационным способом в кипящем слое.

Используя любой из указанных способов, можно достичь необходимую степень измельчения. При этом содержание тонких классов (0–0, 5 мм) в шихте получается меньше при избирательном измельчении и, в особенности, при воздушной сепарации в кипящем слое.

Основными положительными результатами подготовки угля к коксованию методом избирательного измельчения является уменьшение зольности, уменьшение содержания дюрена и увеличение содержания витринита в крупных классах. При любом из указанных способов слабоспекающиеся компоненты (дюрены) должны иметь большую степень измельчения, а хорошо спекающиеся – меньшую.

Положение оптимума измельчения изменяется в зависимости от глубины обогащения углей, их петрографического состава и спекаемости. Чем более уголь минерализован и петрографически неоднороден, тем выше должна быть степень измельчения угля для получения более прочного кокса.

Для уплотнения угольной шихты применяют обмасливание, трамбование, брикетирование и гранулирование всей или части угольной загрузки.

Примеры задач

Задача 1

При обогащении труднообогатимого угля были получены: концентрат с зольностью 10%, промежуточный продукт, содержащий 30% минеральных веществ, при выходе 4,5% и отходы зольностью 72%, выход их составил 25%. Определить зольность рядового угля.

Задача 2

При испытании на обогатимость углей двух различных месторождений методом расслойки проб в тяжелых жидкостях получены следующие результаты по выходу: промежуточных с плотностью 1400–1800 кг/м³ – 3,76%; беспородных с плотностью > 1800 кг/м³ – 84,9% (проба 1) и промежуточных 29,0%; беспородных 71,2% (проба 2) фракций. Определить категорию обогатимости этих углей.

2.2. Сущность процесса коксования

При классическом слоевом процессе коксования нагрев шихты в камере осуществляется в результате внешнего (через стенку) двустороннего подвода тепла. Угольная загрузка под действием высокой температуры последовательно и непрерывно проходит следующие стадии от стен камеры к центру загрузки: подсушки, пластического состояния, полукоксования и образования кокса.

После первого часа от загрузки печи температура поверхности стен снижается до 700–800 °С, затем в течение часа повышается до 900–1000 °С. В осевой плоскости температура (в зависимости от ширины камеры и температур в отопительной системе) достигает 100 °С и остается на этом уровне в течение 7–9 ч., до полного испарения влаги.

Образование летучих веществ по стадиям коксования происходит неравномерно. Основное количество их образуется в период размягчения и после отвердения пластической массы. По данным многих исследователей более 75% всех парогазовых продуктов направляется на горячую сторону, т. е. к греющей стенке.

Пластический слой в угольной загрузке образуется в определенных температурных интервалах, характерных для данной угольной шихты, и пропорционален длительности ее пребывания в пластическом состоянии. Обычно температурные границы пластического состояния смесей оказываются промежуточными по отношению к температурным границам пластического состояния компонентов.

Переход спекающихся углей в пластическое состояние начинается при 50–400 °С. Температура затвердевания пластической массы в пределах 430–480 °С.

Пластические свойства угля зависят прежде всего от степени метаморфизма, от их петрографического и элементного составов и в некоторой степени – от условий термического воздействия, например, скорости нагрева.

Хорошо коксующиеся угли должны иметь большой температурный интервал пластичности, так как в большинстве случаев при более продолжительном пребывании угля в пластическом состоянии меньше летучих веществ выделяется после затвердевания пластической массы; при этом усадка материала, превращающегося в кокс, проходит более равномерно, что способствует образованию кокса с меньшим количеством трещин. Положительным в этом случае является и то, что такие угли способны принимать больше отошающих добавок, что имеет немаловажное практическое значение при введении в шихту слабо-спекающихся (более дешевых) углей.

По некоторым данным толщина пластического слоя, не искаженного вспучиванием (Y_0), пропорциональна температурному интервалу пластичности Δt по уравнению:

$$\dot{O}_0 = 0,185 \cdot \Delta t - 3,3 \quad (6)$$

и обратно пропорциональна скорости нагревания $\Delta t / \Delta \tau$, где $\Delta \tau$ – длительность пребывания угля в пластическом состоянии. Таким образом, с учетом скорости нагревания:

$$\dot{O}_0 = k(\Delta t / (\Delta t / \Delta \tau)) = k \cdot \Delta \tau, \quad (7)$$

толщина пластического слоя пропорциональна длительности пребывания угля в пластическом состоянии; k – коэффициент пропорциональности, мм/мин. При вспучивании пластического слоя следует вводить поправку. Кажущаяся вязкость углей в пластическом состоянии является определяющим фактором вспучивания угольной загрузки при ее равномерном прогреве.

Давление распираания в коксующейся массе возникает при возрастании сопротивления фильтрации газов на горячей стороне. Почти все спекающиеся угли в какой-то мере оказывают временное динамическое давление на стены камер. Наибольшее давление распираания развивают некоторые из углей пониженной спекаемости (К2, ОС6), а также отдельные коксовые угли и угольные шихты на их основе.

Жирные угли, склонные к образованию наибольшего пластического слоя и наибольшему вспучиванию, не развивают опасного давления распираания.

Допускаемая нагрузка на стены печи принимается обычно равной до 8 кПа. При более высоком давлении распираания может произойти деформация кладки печей.

Однако определенная зависимость между давлением распираания и индексом вспучивания углей отсутствует.

Характеристикой поведения угля в процессе коксования является также усадка формирующегося коксового пирога в коксовых печах.

Различают поперечную и вертикальную усадки коксового пирога. Поперечная усадка характеризует сокращение ширины коксового пирога в процессе коксования. Вертикальная усадка вызывает увеличение подсводового пространства в ходе коксования, в результате чего изменяется температура в нем и, следовательно, количество и состав химических продуктов коксования. От вертикальной загрузки зависит величина уровня обогрева коксовых печей.

На величину усадки влияют влажность, гранулометрический состав, выход летучих веществ шихты. В меньшей степени влияют температура и период коксования.

Таким образом, коксование следует рассматривать как сложный физико-химический стадийный процесс превращения каменного угля (шихты) в кокс, сопровождающийся химическими реакциями деструкции органической массы угля и синтеза, в результате чего образуются твердый механически прочный остаток, кокс, а также жидкие и газообразные продукты.

Минеральная часть угля не является инертной составляющей, отдельные компоненты под влиянием высоких температур разлагаются, имеют место восстановительные процессы; не исключено каталитическое влияние минеральных компонентов на ход химических реакций.

2.3. Коксовые печи

Коксовая печь, как теплотехнический агрегат, состоит из камеры, где происходит коксование угля, отопительных простенков, где сгорает отопительный газ, и регенераторов для утилизации тепла отходящих продуктов сгорания. Коксовые печи komponуются в батареи, а последние – в блоки.

Каждая батарея обслуживается комплектом машин, включающим углезагрузочный вагон, коксовытакиватель и двересъемную машину. Коксотушильный вагон с электровозом обычно обслуживает коксовый блок (две батареи).

Согласованность действия коксовых машин определяется их блокировкой, которая заключается в соосной установке коксовыталкивателя, двересъемной машины и электровоза с тушильным вагоном по оси печи, из которой выдается кокс.

Коксовые батареи в России состоят преимущественно из 61, 65 или 77 печей; серийность выдачи кокса из печей: 9–2, 5–2 и 2–1.

За рубежом строятся коксовые батареи с количеством печей до 120.

2.3.1. Классификация коксовых печей

В основу классификации коксовых печей могут быть положены различные признаки, позволяющие оценить конструктивную компоновку отдельных частей печи (элементов), а также технологические и эксплуатационные особенности.

1. По расположению камер коксовые печи делятся на горизонтальные и вертикальные.

2. По способу загрузки шихты и выдачи кокса коксовые печи могут быть с верхней загрузкой и нижней выдачей или с верхней загрузкой шихты и боковой выдачей кокса. При коксовании трамбованной шихты в обычных коксовых печах применяется боковая загрузка.

3. По технологическому режиму производства процесс может быть периодическим или непрерывным.

4. По способу обогрева печи могут иметь комбинированный обогрев (печи могут обогреваться коксовым, доменным и смешанным газами) или обогрев только коксовым или только доменным газами.

5. По способу подвода отопительного газа (коксового и доменного) и воздуха в каналы (вертикалы) отопительных простенков различают печи с боковым или с нижним подводами. Печи с нижним подводом можно разделить на печи с нижним подводом и с нижним регулированием для отопления только коксовым газом, печи с нижним подводом коксового газа и с боковым подводом и с нижним регулированием расхода бедного газа и воздуха и печи с полным (интегральным) нижним подводом газа и воздуха.

6. По возможности применения рециркуляции (с рециркуляцией или без рециркуляции продуктов сгорания).

7. По способу соединения вертикалов, работающих на восходящем и на нисходящем потоках, различают печи с перекидными каналами (с одним или

двумя газоподводящими каналами – корнюрами), с парными вертикалами, с групповым обогревом и верхним сборным каналом.

8. По способу использования тепла отходящих продуктов сгорания печи делят на регенеративные и рекуперативные. В настоящее время работают регенеративные и не регенеративные коксовые печи.

В России строят преимущественно печи систем ПК-2К с боковым подводом и ПВР с боковым и с нижним подводами отопительного газа.

2.3.2. Размеры, производительность и срок службы коксовых печей

В начале 50-х гг. в СССР (Гипрококсом) были разработаны типовые проекты печей с полезным объемом $21,6 \text{ м}^3$ и началось массовое строительство коксовых батарей с боковым подводом отопительных газов и с комбинированным обогревом. Батарея состояла из 61–65 печей. Опыт эксплуатации батарей с печными камерами большего полезного объема (30 м^3) показал, что они обладают значительными резервами увеличения размеров камер и, следовательно, их производительности.

В печах с боковым подводом регулирование расхода газа и воздуха вдоль обогревательного простенка производят заменой регулирующих кирпичей-регистров и горелок, расположенных в основании отопительных каналов, в условиях высоких температур и неизбежных засорений пода каналов. Это затрудняет регулирование и не обеспечивает необходимой точности установки регулирующих устройств. В печах с нижним подводом регулировочные средства вынесены за пределы печной кладки, легко доступны обслуживающему персоналу, находящемуся под верхней плитой коксовой батареи, для замены и регулирования. Эффективность нижнего подвода коксового газа и нижнего регулирования подачи газа и воздуха в отопительные каналы повышается благодаря секционированию регенераторов, что также улучшает омываемость насадки и повышает степень утилизации тепла.

В конструкциях печей для нижнего регулирования подачи воздуха и бедного газа предусмотрена установка снизу печей съемных кирпичей (типа регистров) в колосниковых отверстиях, соединяющих подовый канал с секциями регенераторов. Подача воздуха и бедного газа в подовый канал и отвод из него продуктов сгорания осуществляются через газовоздушные клапаны. Нижнюю часть стен регенераторов выполняют из термостойкого шамотного огнеупора.

Для повышения эффективности нижнего регулирования предусмотрено полное секционирование регенераторов, исключаящее перетоки воздуха и до-

менного газа между секциями. Каждая секция регенератора соединяется косым ходом с отопительным каналом. При указанном секционировании группа из двух сопряженных отопительных каналов и четырех связанных с ними секций является самостоятельным топочным элементом.

В последние годы осуществлен переход к проектированию коксовых батарей системы ПВР с нижним подводом годовой производительностью до 1 млн т кокса с печными камерами высотой 7 м., длиной 16 м и средней шириной 0,41–0,48 м. (полезный объем 41,6–52 м³). Обогрев печей осуществляется только коксовым газом и с нижним регулированием расхода воздуха. Кладку обогревательных простенков предполагают выполнять из динасового кирпича пониженной плотности и повышенной теплопроводности с малым дополнительным ростом в процессе эксплуатации печей. Это должно позволить интенсифицировать технологический процесс в результате увеличения скорости коксования, улучшить условия эксплуатации и удлинить срок службы печей. Коксовые батареи снабжены вентиляционной установкой для поддува очищенного воздуха в подбатарейное помещение, боковые тоннели и подачи его в отопительную систему.

Коксовая камера представляет собой параллелепипед. Высота камеры должна быть такой, чтобы можно было обеспечить равномерность обогрева при достаточной статистической прочности простенка.

Увеличение длины камеры ограничивается статистической прочностью простенков, трудностью удлинения выталкивающих и особенно планирных штанг вследствие увеличения прогиба, сложностью достижения равномерного распределения газов по длине регенератора и обогревательного простенка.

Оптимальное число печей в батарее должно обеспечивать наибольшую производительность батареи при наилучшем использовании коксовых машин и наибольшей производительности труда. Таким образом, выбранные размеры камеры и число печей в батарее должны быть экономически эффективны, т. е. обеспечивать наименьшие капитальные и эксплуатационные затраты на 1 т перерабатываемой угольной шихты.

Производительность коксовой батареи определяется следующими факторами: 1) числом и размерами камер, материалом и толщиной стенок, способами загрузки (насыпью или трамбованием) и обогрева, эти факторы указаны в проекте и не могут быть изменены в период эксплуатации батареи; 2) температурой обогрева (отопительных простенков – контрольных вертикалов), которая при эксплуатации может изменяться в некоторых пределах; степенью готовности

кокса; 3) характеристикой загружаемой шихты: составом и характеристикой каждого компонента шихты, влажностью и гранулометрическим составом.

При проектировании батареи все эти факторы принимают во внимание. Однако на практике часто характеристика шихты может отличаться от предусмотренной проектом, что повлечет и изменение производительности батареи по продуктам коксования.

Плотность насыпной массы можно изменять, меняя гранулометрический состав. Для влажного угля плотность тем меньше, чем мельче уголь.

Для термически подготовленного сухого угля плотность загрузки практически не зависит от гранулометрического состава.

При добавке в шихту производственной влажности микродобавок – небольших количеств (0,5–1,0%) продуктов переработки нефти и жидких продуктов термической переработки твердых топлив – плотность загрузки возрастает с увеличением содержания масла во влажной шихте; при добавке в сухую шихту она, наоборот, снижается.

Трамбование шихты позволяет повысить плотность на 30% по сравнению с загрузкой насыпью.

Производительность проектируемой коксовой батареи по коксу 6%-ной влажности рассчитывается по формуле, т/ч:

$$G = \frac{nV\gamma}{0,94\tau_{\text{i}\dot{\text{a}}}} \cdot \frac{G_{\text{e}}^{\text{c}}}{100} = \frac{nb_{\text{н}\dot{\text{o}}}lh\gamma}{0,94\tau_{\text{i}\dot{\text{a}}}} \cdot \frac{G_{\text{e}}^{\text{н}}}{100}, \quad (8)$$

где n – число печей в батарее; V – полезный объем камеры, нм^3 ; γ – плотность насыпной массы шихты (в пересчете на сухую шихту), т/нм^3 ; h – полезная высота камеры, м; $b_{\text{н}\dot{\text{o}}}$ – средняя ширина камеры, м; l – полезная длина камеры, м; G_{e}^{c} – выход кокса из сухой шихты, %; $\tau_{\text{i}\dot{\text{a}}}$ – продолжительность оборота печи, ч.

Как видно из этих данных, объем камеры увеличивается в результате увеличения ее высоты и длины, тогда как ширина изменяется для российских конструкций, в основном украинского Гипрококса, в незначительных пределах (410–480 мм).

Соотношение между шириной камеры и периодом коксования при одинаковых температурах в контрольных вертикалах и одной и той же температуре готового кокса (коксового пирога) выражается формулами:

$$\tau_1/\tau_2 = (b_1/b_2)^{1,1(t_{\text{A}}/t_{\text{E}})}, \quad (9)$$

$$\tau_1/\tau_2 = (b_1/b_2)^n, \quad (10)$$

где τ_1 и τ_2 – периоды коксования, ч; b_1 и b_2 – средняя ширина камер, мм; t_B – средняя температура в контрольных обогревательных каналах; t_K – температура в центре коксового пирога. Величина n , полученная разными исследователями, колеблется в пределах $1 < n < 2$ ($n = 1,55 \div 1,65$; $n = 1,2$; $1, n = 0,6 \pm 0,03$).

Как указывалось, выбор ширины камеры определяется прежде всего свойствами коксуемой шихты и требуемым качеством кокса. При коксовании хорошо спекающихся шихт рекомендуется выбирать более широкую камеру, а при коксовании плохо спекающихся шихт из малометаморфизованных углей – более узкую. Отечественные коксовые печи обычной емкости имеют среднюю ширину камеры коксования 410 мм, печи большей емкости 450–480 мм, что связано с увеличением доли газовых углей в шихте.

Коксовые печи зарубежных заводов имеют ширину печных камер главным образом 450–460 мм, реже – 530–590 мм.

Производительность коксовых печей может быть повышена не только в результате увеличения объема печей, но также при коксовании термически подготовленных шихт (высушенных до влажности 1–3% или нагретых до 120–150 °С) и интенсификации процесса коксования увеличением скорости коксования при снижении ширины камер, повышении температур в отопительных каналах и теплопроводности огнеупоров.

Повышение температуры в отопительных простенках ограничено допустимой максимальной температурой (1450 °С) для используемых в настоящее время огнеупорных кирпичей. В практике работы российских коксовых батарей максимальные температуры коксования составляют 1410 °С.

Возрастающая доля газовых углей в шихте (до 35–40%) повышает трещиноватость кокса при больших скоростях коксования, поэтому увеличение скорости должно согласовываться с составом шихты и качеством получаемого кокса.

Задача 3

Коксовый цех из 4-х батарей, в каждой из которых по 65 печей. Полезный объем камер коксования – 30 нм³.оборот печей 15 ч. После 18 дней работы баланс выявил невыполнение плана на 2% по валовому коксу.

Определить необходимый оборот коксовых печей для того, чтобы за оставшиеся 12 дней месяца выйти на месячное выполнение плана на 100,1%. Плотность насыпной массы шихты 0,733 т/нм³. Выход валового кокса от шихты составляет 75%.

2.3.3. Обогрев коксовых печей

Для обогрева коксовых печей применяют коксовый, доменный, генераторный газы, смесь доменного и коксового. Возможно также использование для этой цели природного газа и обезводороженного коксового в смеси с доменным. Ниже приведены основные характеристики отопительных газов.

1. *Коксовый газ*. Состав, % (объемн.): H_2 55,8–61,00; CH_4 24,50–26,9; CO 5,70–8,00; CO_2 1,65–3,00; C_mH_n 2,03–3,02; N_2 2,80–4,89; O_2 0,32–0,73; $Q_i = 16,74 \div 18,84$ МДж/нм³; $\rho_0 = 0,41$ –47 кг/нм³.

Пределы взрываемости в воздухе, % (объемн.): $P_{ниж} = 6,0$; $P_{верх} = 30$; диапазон взрываемости 24%. Температура воспламенения 600–650 °С. Максимальная скорость распространения пламени 70–75 см/с. Отравляющее действие оказывает концентрация в воздухе 1,4–1,7% (об.) и более.

2. *Доменный газ*. Состав, % (объемн.): CO 23,48–27,30; CO_2 13,60–16,31; H_2 2,10–5,81; CH_4 0,20–0,50; N_2 53,49–56,20; O_2 0,08–0,40; $Q_i = 3,62 \div 3,74$ МДж/нм³; $\rho_0 = 1,23 \div 1,32$. Пределы взрываемости в воздухе, % (объемн.): $P_{ниж} = 36,0$; $P_{верх} = 72,0$. Предельное содержание пыли в доменном газе, поступающем на обогрев коксовых печей, допускается не более 10 мг/нм³. Содержание оксида углерода в воздухе в количестве 0,06% вызывает головокружение, 0,2% – потерю сознания. Предельно допустимое содержание его в воздухе – 0,02 г/нм³. Добавка коксового газа к доменному обычно не превышает 5%, а природного – 2,5%.

Большинство действующих коксовых батарей имеет комбинированный обогрев, т. е. может отапливаться коксовым и доменным газами. Для отопления строящихся в последние годы печей с нижним подводом чаще всего используют только коксовый газ. При проектировании печей обычно в конструкцию закладывают определенные возможности обогрева их тем или иным газом. Вопрос выбора газа для обогрева решается в зависимости от баланса газов, состояния кладки печей, наличия потребителей коксового газа, доменного производства и других факторов.

Нормальный теплотехнический режим коксовых печей легче поддерживать, если печи обогреваются коксовым газом.

Схемы движения газов в отопительной системе независимо от различия в конструкциях коксовых печей имеют следующие общие признаки. Воздух (рис. 1) поступает через воздушные отверстия в газоздушных клапанах в регенератор снизу в точке *а*, проходит в нем вверх до точки *б*, нагреваясь до 1100–1200 °С, затем поступает через соединительные каналы (косые ходы) (участок *б–в*) в отопительные каналы (вертикалы), где происходит смешивание газа с подведенным воздухом и его сгорание.

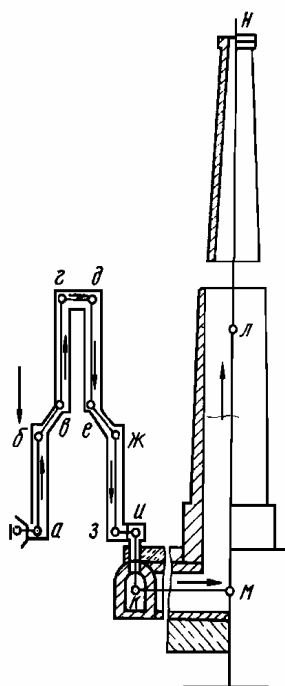


Рис. 1

Коксовый газ подводится из газораспределительного канала (корнюра), если печи с боковым подводом отопительного газа, или через дюзовые каналы, если печи с нижним подводом коксового газа.

Доменный газ подводится по соединительному каналу (косому ходу) из регенератора. В отопительных каналах (вертикалах) (их число в простенке зависит от его длины и составляет 32–34) газ, смешиваясь с воздухом, сгорает. Продукты сгорания поднимаются к перевалу в точке *г*. У основания вертикала (в точке *б*) температура газов резко повышается (факел горения) и остается на всем участке *б–г* намного выше, чем в зоне косых ходов; это так называемая восходящий поток отопительной системы. Далее газы переходят на нисходящий поток. Часть из них – по каналу, который в одних системах печей

представляет собой окно из одного вертикала в другой в смежный вертикал, соседний с ним (печи ПВР), основная часть – через соединительный канал (косой ход) в регенератор, в других – участок вдоль всего простенка (печи с групповым обогревом и верхним сборным каналом), в третьих – перевал через камеру (печи ПК). Пройдя этот канал, продукты сгорания (с температурой $\sim 1300^\circ\text{C}$) опускаются на другой половине отопительных каналов (участок *д–е*); температура их при этом изменяется незначительно. Далее они проходят через соединительные каналы (косые ходы) (участок *е–ж*) в регенератор, охлаждаясь, передают тепло насадке (участок *ж–з*). При этом температура продуктов сгорания снижается с 1250 до $400\text{--}300^\circ\text{C}$; это так называемый нисходящий поток отопительной системы. От точки *з*, пройдя участок подового канала регенератора до точки *и*, продукты сгорания поступают в направлении *и–к* через дымовой патрубок в сборный боров, а потом – в общий боров (участок *к–л*) и в дымовую трубу (*л–м*).

При изучении характера движения газов в отопительной системе следует оценивать работу отопительного простенка в целом и отопительных каналов на восходящем и на нисходящем потоках, сопряжение регенераторов с простенками, тип регенераторов и состав отопительного газа.

Увеличение равномерности обогрева печей по высоте и длине камеры обеспечивает более ровную готовность кокса, что повышает его прочность.

Одновременная готовность кокса по длине камеры, имеющей конусность, достигается благодаря дифференцированному подводу отопительного газа и воздуха в каждый отопительный канал по длине камеры коксования (температурная кривая), а по высоте – вытягиванием факела, например, вследствие рециркуляции продуктов сгорания.

Полнота сгорания газа обеспечивается подачей в зону горения большего количества кислорода, чем это требуется по молекулярному соотношению. Коэффициентом избытка воздуха « α » называют отношение действительного расхода воздуха (кислорода) (L_d) к теоретическому (L_T , $\text{нм}^3 \text{O}_2/\text{нм}^3$ газа); он рассчитывается по формуле:

$$\alpha = L_{O_2}^A / L_{O_2}^T, \quad (11)$$

$$L = \frac{0,5(\text{CO} + \text{H}_2) + 2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_4 - \text{O}_2}{100}, \quad (12)$$

где CO , H_2 , CH_4 , C_2H_4 , O_2 – компоненты отопительного газа, %.

Коэффициент избытка воздуха влияет на теплотехнические показатели коксовых печей, поэтому необходимо поддержание его в оптимальных пределах, что достигается регулярным контролем и регулированием. Коэффициент избытка воздуха можно рассчитать по формуле Юшина по результатам анализа продуктов сгорания:

$$\alpha = 1 + k[(\text{O}_2 - 0,5\text{CO})/(\text{CO}_2 + \text{CO})], \quad (13)$$

где O_2 , CO , CO_2 – содержание компонентов в продуктах сгорания; k – коэффициент, зависящий только от состава отопительного газа.

При практических расчетах принимают для коксового газа $k = 0,43$, для доменного – $k = 2,50$.

Обычно при отоплении печей коксовым газом α составляет 1,25–1,35, а при отоплении доменным газом – 1,15–1,20. Коэффициент избытка воздуха зависит и от системы печей.

Среднединамическая температура в осевой плоскости коксового пирога (измерения на высотах 0, 6; 2, 1; 3, 5 м. и т. д, зависимости от высоты камеры коксования от пода камеры) к концу коксования должна быть 1050 ± 50 °С, а ее распределение по высоте зависит от системы печей и рециркуляции продуктов сгорания.

Поддержание теплового режима коксовых печей, соответствующего установленному периоду коксования, достигается регулярным измерением температур по контрольным вертикалам вдоль батареи (один раз в смену) и периодиче-

ским (один раз в три месяца) – по всем вертикалам и их регулированием, что обеспечивает получение кокса высокого качества и сохранность коксовых печей. Разность температур по контрольным вертикалам одного простенка зависит от длины камеры и от ее конусности и обычно находится в пределах 40–60 °С. В связи с тем, что в отопительной системе коксовых печей направление движения газоздушных потоков через определенное время (20–30 мин) меняется (кантовка), соответственно непрерывно изменяется и температура. Так на восходящем потоке в регенераторах температура непрерывно понижается, а в простенках – повышается. На нисходящем потоке, наоборот: в регенераторах – повышается, а в простенках – понижается.

Изменение температуры зависит от многих факторов, определяющими из которых являются время между кантовками, род отопительного газа и конструкция коксовых печей. Из всего подводимого полезного тепла ~95% передается в вертикалах на восходящем потоке и лишь 5% – на нисходящем потоке. Тепло передается лучеиспусканием (~80%) образующихся при сгорании диоксида углерода, водяного пара и частиц углерода, а также конвекцией (~20%).

Коксовый газ сгорает с большей скоростью, т. е. коротким факелом, поэтому необходимы специальные мероприятия для достижения равномерного обогрева по высоте: уменьшение скорости горения путем параллельного ввода газа и воздуха или примешивания продуктов сгорания к газу (рециркуляция), а также ступенчатый подвод газа и воздуха.

Для того чтобы коксование в осевой плоскости угольной загрузки заканчивалось одновременно по всей длине камеры, количество тепла, подводимого к соответствующим участкам загрузки, должно быть пропорционально ширине этого участка. Головочные вертикалы должны иметь увеличенный приток тепла для компенсации его потерь через наружные поверхности.

Расход тепла на коксование зависит от многих факторов: состава и качества шихты, ее влажности, периода коксования, вида отопительного газа, системы печей и др. Практика работы коксовых печей показывает, что при изменении периода коксования на 1 ч требуется соответствующее изменение температуры в контрольных вертикалах приблизительно на 25–30 °С. При этом изменение периода коксования по сравнению с оптимальным на 1 ч повышает удельный расход тепла на 25,12–29,30 кДж/кг шихты.

Расход тепла при обогреве печей доменным газом при прочих равных условиях на 10–20% выше, чем при обогреве коксовым газом. При повышении коэффициента избытка воздуха на 0,1 расход тепла увеличивается на 1,5%. При изменении влажности шихты от 8%-ной (в пределах 6–10%) на 1% влажности

расход тепла изменяется примерно на 33 кДж/кг. Равномерность обогрева по длине батареи характеризуется коэффициентом равномерности среднесуточных температур в контрольных вертикалах, который определяется по формуле:

$$k_6 = [2m - (d_i + d_e)]/2m, \quad (14)$$

где k_6 – коэффициент равномерности температур в контрольных вертикалах по длине батареи; m – число простенков батареи, за исключением двух крайних, примыкающих к контрфорсам, а также ремонтируемых и буферных печей; d_m , d_k – число простенков с отклонениями температур в контрольных вертикалах соответственно с машинной и с коксовой сторон более ± 20 °С от среднесуточной температуры по данной стороне батареи.

На хорошо отрегулированной батарее k_6 составляет 0,85–0,95. Постоянство среднесменных температур по длине батареи характеризуется коэффициентом равномерности среднесменных температур, определяемых по формуле:

$$k_n = [2n - (d_i + d_e)]/2n, \quad (15)$$

где n – число замеров по длине батареи за учитываемый период; d_m , d_k – число отклонений средних температур в контрольных вертикалах соответственно на машинной и на коксовой сторонах батареи более чем на ± 7 °С от заданной по технологическому регламенту для данного оборота печей.

Задача 4

Продукты сгорания коксового газа имеют состав, %: CO₂ 8, 5; O₂ 2, 5; CO 0, 2. Определить значение α .

Задача 5

В результате совершенствования схемы подготовки углей для коксования плотность насыпной массы возросла с 750 до 780 кг/нм³.

Ваши действия по регулировке обогрева коксовых печей?

Обогрев производится коксовым газом с теплотой сгорания $Q_i = 18500$ кДж/нм³. Расход газа на обогрев следующий:

- машинная сторона – 5700 нм³/ч;
- коксовая сторона – 6200 нм³/ч.

Напоминаем, что для поддержания степени готовности кокса на постоянном, установленном уровне необходимо обеспечивать стабильность количества тепла, передаваемого угольной загрузке.

Задача 6

Плотность насыпной массы шихты уменьшилась с 775 до 760 кг/нм³ при неизменной влаге и других параметрах ее качества.

Определить требуемые изменения расхода газа на обогрев батареи для сохранения постоянным уровня готовности кокса. Прежнее значение общего расхода – $11220 \text{ нм}^3/\text{ч}$.

Задача 7

В результате длительных дождей влажность шихты увеличилась на 2%. Марочный состав и технический анализ шихты остаются прежними.

Как изменить расход отопительного газа и температуру в контрольных вертикалах, чтобы сохранить заданную готовность кокса.

Влажность шихты – 9%;

Расход отопительного газа – $11000 \text{ нм}^3/\text{ч}$;

Температура в контрольных вертикалах:

– с машинной стороны – 1300°C ;

– с коксовой стороны – 1345°C .

Удельный расход тепла на коксование влажной шихты $q_{\text{в.ш.}} = 2480 \text{ кДж/кг}$.

Напоминаем, что каждый процент влаги в шихте увеличивает фактический удельный расход тепла на коксование примерно на $33,5 \text{ кДж/кг}$, а также требует увеличения температуры в простенках на $5\text{--}7^\circ\text{C}$.

При решении задачи следует иметь ввиду, что относительное изменение удельного расхода тепла на коксование соответствует требуемым относительным изменениям расхода отопительного газа на обогрев.

Задача 8

1. Влажность шихты с 11% уменьшилась до 7%;

2. Расход отопительного газа – $12000 \text{ нм}^3/\text{ч}$;

3. Температура в контрольных вертикалах:

– с машинной стороны – 1295°C ;

– с коксовой стороны – 1320°C .

4. Удельный расход тепла на коксование влажной шихты $q_{\text{в.ш.}} = 2495 \text{ кДж/кг}$.

Напоминаем, что каждый процент влаги в шихте увеличивает фактический удельный расход тепла на коксование примерно на $33,5 \text{ кДж/кг}$, а также требует увеличения температуры в простенках на $5\text{--}7^\circ\text{C}$.

Определить необходимые изменения расхода отопительного газа и температуры в контрольных вертикалах для сохранения готовности кокса на прежнем уровне.

Задача 9

В целях повышения прочности кокса по сопротивлению истирающим воздействиям принято решение увеличить степень готовности кокса.

Температуру в осевой плоскости коксового пирога требуется повысить с 1000 до 1050 °С. Удельный расход тепла на коксование при 1000 °С составляет $q_{\text{ш}} = 2520$ кДж/кг.

Определить необходимые для этого изменения температуры в обогревательных простенках и расход тепла на коксование в условиях постоянного периода коксования.

Из практики обогрева коксовых печей известно, что для повышения температуры в осевой плоскости коксового пирога на 25–30 °С требуется температуру в контрольных вертикалах повысить на 10 °С, т. е. для повышения температуры на 1 °С в осевой плоскости надо в вертикалах ее увеличить на $10/25 \div 10/30 = 0,4 \div 0,33$ °С. Для увеличения температуры в осевой плоскости на 50 °С в вертикалах надо ее поднять на 17–20 °С ($0,33 \cdot 50 \approx 17$; $0,4 \cdot 50 = 20$).

Задача 10

При обогреве доменным газом и $\alpha = 1,1$ в продуктах сгорания обнаружено 1,2% СО. Их количество составляет на 1 нм³ газа 1,67 нм³. Определить потери тепла в связи с неполным сгоранием газа.

Задача 11

При обогреве доменным газом изменение коэффициента избытка воздуха с 1,3 на 1,5 привело к увеличению количества продуктов горения на 1 нм³ газа с 1,85 до 2 нм³. Температура продуктов горения 300 °С, их объемная теплоемкость составляет 1,47 кДж/(нм³·К).

Определить дополнительный унос тепла.

Задача 12

Определить нормальную калориметрическую температуру ($t_{\text{н.к}}$) обезводороженного коксового газа, состав которого приведен в таблице 4. Для этого газа $Q_i = 23100$ кДж/нм³, $V_{\text{п.г.}} = 6,79$ нм³.

Задача 13

Определить по упрощенной методике нормальную калориметрическую температуру доменного и коксового газов, данные о которых приведены в таблицах 5, 6, 7.

Задача 14

Определить по упрощенной методике калориметрическую температуру горения коксового газа, данные о котором приведены в таблицах 5, 7, при температуре подогрева воздуха 1000 °С и $\alpha = 1,3$. Для расчета по формуле:

$$t_{\text{г}} = \frac{Q_i + Q_{\text{га}} + Q_{\text{ва}}}{V_{\text{га}} \cdot \tilde{n}_{\text{га}} + V_{\text{ва}} \cdot \tilde{n}_{\text{ва}}}$$

воспользуемся следующими исходными данными: $Q_i = 17700 \text{ кДж/нм}^3$; $V_{\text{вд}} = 5,54 \text{ нм}^3$; $V_{\text{ви}} = 1,28 \text{ нм}^3$; $Q_{\text{эв}} = 5,54 \cdot 1,41 \cdot 1000 = 7800 \text{ кДж/нм}^3$.

Задача 15

Определить калориметрическую температуру горения доменного газа, данные о котором приведены в таблицах 6, 7, при температуре подогрева газа и воздуха 1000°С . Для расчета по формуле:

$$t_{\text{г}} = \frac{Q_i + Q_{\text{га}} + Q_{\text{ва}}}{V_{\text{га}} \cdot \tilde{n}_{\text{га}} + V_{\text{ва}} \cdot \tilde{n}_{\text{ва}}}$$

воспользуемся следующими исходными данными: $Q_i = 4070 \text{ кДж/нм}^3$; $V_{\text{в.д.}} = 0,92 \text{ нм}^3$; $V_{\text{в.н.}} = 0,16 \text{ нм}^3$; $Q_{\text{э.в.}} = 0,92 \cdot 1,38 \cdot 1000 = 1270 \text{ кДж/нм}^3$; $Q_{\text{э.г.}} = 1 \cdot 1,55 \cdot 1000 = 1550 \text{ кДж/нм}^3$.

Задача 16

Определить теоретическую температуру горения доменного газа при условиях, принятых в задаче 14. Согласно данным таблицы 6: $V_{\text{и}_2\text{О}} = 0,07 \text{ нм}^3/\text{нм}^3$; $V_{\text{СО}_2} = 0,402 \text{ нм}^3/\text{нм}^3$.

Степень диссоциации H_2O и CO_2 при температуре порядка 2000°С и парциальном давлении, соответствующем их объемной доле в продуктах горения, % (для H_2O – 4, для CO_2 – 24,6), составят (см. рис. 2) $\varepsilon_{\text{и}_2\text{О}} = 0,05$, $\varepsilon_{\text{СО}_2} = 0,1$.

Задача 17

Известно, что $q_{\text{в.ш.}} = 2700 \text{ кДж/кг}$ при $W = 10\%$. Определить $q_{\text{с.ш.}}$.

Задача 18

Определить $q_{\text{п.р.}}$, если при влажности шихты $W = 10\%$ расход тепла $q_{\text{в.ш.}} = 2640 \text{ кДж/кг}$.

2.3.4. Гидравлический режим коксовых печей

Под гидравлическим режимом коксовых печей понимают регламентированное распределение давлений в отопительной системе (регенераторы, вертикалы, борова, труба) и в камерах. Инженером Р.З. Лернером в 1937–1939 гг. разработаны следующие основные принципы гидравлического режима:

1. Давление в нижней части камеры к концу коксования должно быть положительным.

2. Давление в нижней части камеры к концу коксования должно быть больше давления в верхней части регенератора с восходящим потоком во всех случаях эксплуатации коксовых печей (нормальная работа, изменение периода коксования, остановка выдачи и остановка обогрева).

3. Распределение давления по высоте огневой системы должно быть постоянным в пределах одного периода коксования.

Гидравлический режим поддерживается таким, чтобы обеспечить в случае образования трещин в кладке постоянство перетоков газа из печных камер в отопительную систему в течение всего периода коксования и избежать перетоков продуктов сгорания из атмосферы и из отопительной системы в камеру.

Такое направление потока газа обеспечивает герметичность кладки в результате отложений в трещинах и в порах графита, образующегося при пиролизе углеводородов парогазовых продуктов коксования.

Многолетний опыт, специальные исследования и расчеты специалистов Коксохимической станции позволили выделить основные параметры, характеризующие правильный гидравлический режим коксовых печей:

1) Давление газа в камерах коксования от начала загрузки до отключения от газосборника должно быть всегда выше, чем в любой точке сопряженных с ними элементов отопительной системы и выше атмосферного давления.

2) Давление газов в камере в течение периода коксования является переменной величиной: резко колеблется и может в течение короткого промежутка времени непосредственно после загрузки повыситься до 980–1000 Па и более.

3) К концу периода коксования в камере может возникнуть разрежение. Это связано с условиями газовыделения (выход летучих из шихты обычно до 30%, а из готового кокса в пределах 1%). Однако оно должно поддерживаться положительным.

4) Перед выдачей кокса из печей перед отключением печи от газосборника давление газа у стены камер на уровне их пода должно быть не ниже 5 Па и не выше 20 Па. Для обеспечения положительного давления в камере коксования устанавливают соответствующее давление в газосборниках, которое автоматически поддерживают постоянным и регулируют. Обычно давление в камерах с полезной емкостью 21,6 м³ составляет 120–140 Па, а в печах большой емкости и выше.

5) Давление газа в отопительной системе на восходящем потоке должно быть ниже, чем в любой точке сопряженной с ними камеры коксования. Для этого вверху вертикалов на восходящем потоке под крышками смотровых лючков должно поддерживаться давление 2 Па с колебаниями не более ± 1 Па.

Указанные параметры являются одинаковыми для коксовых печей всех систем независимо от периода коксования, рода отопительного газа и времени года.

Увеличение или уменьшение разрежения в отдельных участках отопительной системы коксовых печей соответственно изменяет поступление газа и воздуха. Например, увеличение тяги в боровых и разрежения в наднасадочном пространстве («на глазках») регенераторов на нисходящем потоке без изменения размеров сечений для прохода газа и воздуха обуславливает поступление большего количества воздуха и частично газа. Таким образом изменение гидравлического режима в отопительной системе влияет на расход газа и, следовательно, на температурный режим печей. Поэтому для определенного периода коксования устанавливают и поддерживают постоянным разрежение в контрольных точках отопительной системы.

Полное уплотнение кладки камер вновь введенных в эксплуатацию батарей вследствие отложений графита в возможных неплотностях наступает обычно через 4–5 месяцев после пуска батареи. Для этой цели в этот период давление в газосборниках устанавливается на 30–50 Па выше необходимого. Характерными точками отопительной системы для оценки гидравлического режима являются газовоздушный клапан, «глазок» регенератора и верх вертикала (под крышкой смотрового лючка).

На восходящем потоке движение газов происходит от точек обогревательной системы с меньшим давлением к точкам с большим давлением. Такое направление движения обусловлено гидростатическим напором воздуха и бедного газа, подогретых в регенераторах и имеющих высокую температуру продуктов сгорания газа в вертикалах. На нисходящем потоке движущей силой является разрежение, создаваемое дымовой трубой.

2.3.5. Эксплуатация коксовых печей

Период коксования (промежуток времени от загрузки камеры шихтой до выдачи кокса) зависит прежде всего от ширины камеры, толщины стен, температуры в отопительных простенках, свойств огнеупорных материалов и шихты.

Максимальная скорость коксования на действующих динасовых коксовых печах при допустимых температурах в обогревательных простенках может достигать 30–32 мм/ч. Дальнейшее увеличение скорости коксования в результате повышения температур в обогревательных простенках возможно лишь при использовании для кладки простенков новых огнеупорных материалов или динаса

улучшенного качества. Температура коксового пирога перед выдачей должна быть 1000–1050 °С.

Для обработки печи (подготовка печи к выдаче кокса, его выдача, подготовка печи к загрузке шихты, загрузка последней в камеру) машины затрачивают 10–15 мин.

Суммарное время, включающее период коксования и время обработки печи, называют оборотом печи.

Технология эксплуатации коксовых печей включает загрузку камеры шихтой, выдачу готового кокса в тушильный или в коксовозный вагоны, проведение операций по тушению (охлаждению) и сортировке кокса. Загрузку камер коксования шихтой и выдачу кокса производят в определенной последовательности, называемой серийностью. Серийность (очередность) выдачи кокса из печей определяется условиями предохранения стен камер от деформаций и более рационального использования машин.

В настоящее время на коксохимических предприятиях России обработку печей ведут по серийности 9–2, 5–2 и 2–1. Первая цифра показывает на сколько групп (серий) разделено общее число печей батареи, обслуживаемой одним комплектом машин. Вторая цифра показывает, в какой последовательности обрабатывают серии печей. При серийности выдачи кокса 2–1 последовательно выдается кокс из всех нечетных печей (1, 3, 5, 7, 9, 11, ... , 63, 65), а затем из всех четных (2, 4, 6, 8, 10, 12, ... , 62, 64).

Для обеспечения одинаковой продолжительности оборота всех печей составляют поминутный график выдачи кокса из камер с указанием времени в часах и минутах. На отечественных коксохимических заводах используют циклический график выдачи, по которому продолжительность оборота разделяют на две части – рабочую и ремонтную. Во время рабочей части выдается готовый кокс, а во время ремонтной производится уборка рабочих мест и путей, ремонт и проверка механизмов и т. п. Циклический график повышает культуру производства и предотвращает аварии.

Бездымная загрузка коксовых печей производится по программе в определенной последовательности.

Нормальная работа коксовой батареи характеризуется равномерностью выдачи кокса из печей, которая оценивается при помощи коэффициентов равномерности – расчетного, исполнительного и общего.

При эксплуатации печей уделяют большое внимание уплотнению дверей.

Срок службы печей увеличивается при хорошем уходе за ними, своевременном выполнении профилактических и текущих ремонтов кладки печей.

Задача 19

Определить сопротивление воздушного регенератора на восходящем потоке между точками 1, 2 (для примеров 18–23 точки указаны на рис. 3). Давление в подовом канале $P_1 = -50$ Па, на «глазках», т. е. в наднасадочном пространстве регенератора $P_2 = -35$ Па, высота регенератора $H = 2,5$ м, температура воздуха в туннеле -15 °С, над насадкой -1100 °С, в подовом канале -60 °С.

Задача 20

Определить сопротивление регенератора на нисходящем потоке между точками 4, 5. Давление в подсводовом пространстве регенератора $P_4 = -80$ Па, в подовом канале $P_5 = -110$ Па, температура воздуха в туннеле -15 °С, продуктов сгорания вверху регенератора -1300 °С, в подовом канале -290 °С; плотность продуктов сгорания $-1,4$ кг/м³.

Задача 21

Определить в общем виде сопротивление верхней части отопительной системы между «глазками» регенераторов восходящего и нисходящего потоков.

Задача 22

Давление $P_2 = -35$ Па; $P_4 = -80$ Па. Как следует изменить давление в «глазке» регенератора с нисходящим потоком, чтобы увеличить количество проходящих газов на 10%? Как возрастут при этом сопротивления?

Задача 23

Как изменятся сопротивления отопительной системы при уменьшении периода коксования с 16 до 14 ч.?

Задача 24

Анализ продуктов сгорания показал, что при коэффициенте избытка воздуха 1,08 газ сгорает не полностью. Давление в «глазке» регенератора на восходящем потоке $P_2 = -40$ Па, на нисходящем $P_4 = -100$ Па. Для обеспечения полноты сгорания нужно установить коэффициент избытка воздуха 1, 2. Как следует изменить давление в «глазке» регенератора на нисходящем потоке, не меняя при этом давления в регенераторе на восходящем потоке?

Задача 25

Производится замер давления на поду камеры коксовой печи (рис. 4). При установке дифференциального манометра на обслуживающей площадке на уровне пода оно составило $P_2 = 10$ Па. Как изменится показание дифференциального манометра, если его установить на площадке газосборника P_1 или в туннеле P_3 ?

Задача 26

Показать, чему должны быть равны давление у основания дымовой трубы и высота дымовой трубы. В данном примере на входе в систему у газоздушного клапана находится точка 0, у основания дымовой трубы – точка m , на выходе из дымовой трубы – точка n .

Задача 27

Температура окружающего воздуха повысилась с 10 до 30 °С. Найти требуемое разрежение вверху регенераторов при 30 °С при условии, что расход отопительного газа и объем воздуха, подаваемого на обогрев, должны остаться прежними. Обогрев печей производится коксовым газом.

Исходные данные:

- 1) Разрежение вверху регенераторов при 10 °С на восходящем потоке – 55,9 Па (5,7 мм вод. ст.), на нисходящем потоке – 72,6 Па (7,4 мм вод. ст.).
- 2) Средние температуры в регенераторах на восходящем потоке – 590 °С, на нисходящем потоке – 830 °С.

Высота регенератора – 2,7 м. Так как давление в любой точке отопительной системы равно сумме потерь напора и гидростатического напора (подпора) на данном участке, то при постоянном расходе не должны зависеть от изменения гидравлических условий прохождения воздуха.

Раздел III. Примеры решения

Задача 1

Находим процентный выход ($A_{p.y.}$) концентрата:

$$100 - 4,5 - 25 = 70,5\%$$

Зольность рядового угля равна:

$$A_{\delta.o.} = \frac{10 \cdot 70,5 + 30 \cdot 4,5 + 72 \cdot 25}{100} = 26,4\%$$

Задача 2

Обогащаемость равна

$$T = \gamma_{i\delta} / (100 - \gamma_i) \cdot 100, \%$$

где $\gamma_{пр}$ – выход промежуточных фракций, γ – 1400–1800 кг/нм³,

γ_n – выход беспородной массы, $\gamma < 1800$ кг/нм³.

Таким образом:

1. $(3,76/84,9) \cdot 100 = 4,43\%$, т. е. легкая;
2. $(29,0/71,2) \cdot 100 = 40,7\%$, т. е. очень трудная.

Задача 3

Суточная производительность по валовому коксу $G_{\hat{e}}^{\hat{a}}$ 6% влажности определяется по формуле:

$$G_{\hat{e}}^{\hat{a}} = \frac{24 \cdot n \cdot V \cdot \gamma \cdot B_{\hat{e}}^{\hat{n}}}{0,94 \cdot \tau_{\hat{i}\hat{a}} \cdot 100}, \text{ т,}$$

где n – число печей;

V – полезный объем, нм^3 ;

γ – плотность насыпной массы в пересчете на сухую, т/нм^3 ;

$B_{\hat{e}}^{\hat{n}}$ – выход валового кокса из сухой шихты, %;

$\tau_{\hat{i}\hat{a}}$ – продолжительность оборота печей, ч.;

0,94 – переводный коэффициент сухого кокса на кокс, содержащий 6% влаги.

$$G_{\hat{e}}^{\hat{a}} = \frac{24 \cdot 4 \cdot 65 \cdot 30 \cdot 0,733 \cdot 75}{0,94 \cdot 15 \cdot 100} = 7298,8 \text{ т.}$$

За месяц (т. е. за 30 дней по условиям задачи) план производства был равен:

$$7298,8 \cdot 30 = 218964 \text{ т.}$$

За 18 суток следовало произвести по плану:

$$7298,8 \cdot 18 = 131378,5 \text{ т.}$$

Фактически произвели:

$$131378,5 \cdot 0,98 = 128751 \text{ т.}$$

Недопроизводство составило:

$$131378,5 - 128751 = 2627,5 \text{ т.}$$

За оставшиеся 12 дней плановое производство должно составить:

$$7298,8 \cdot 12 = 87585,6 \text{ т.}$$

Для перевыполнения плана на 0,1% необходимо произвести сверх плана:

$$218964 \cdot 0,001 = 218,9 \text{ т.}$$

Таким образом за оставшиеся 12 дней необходимо произвести:

$$87585,6 + 2627,5 + 218,9 = 90432 \text{ т.}$$

Суточное производство должно быть равно:

$$90432/12 = 7536 \text{ т.}$$

Это может быть обеспечено при обороте коксовых печей:

$$\tau_{\hat{i}\hat{a}} = \frac{24 \cdot 4 \cdot 65 \cdot 30 \cdot 0,733 \cdot 75}{0,94 \cdot 7536 \cdot 100} = 14,53 \text{ ч, т. е. 14 ч 32 мин.}$$

Задача 4

Находим:

$$\alpha = 1 + \hat{E} \frac{[O_2] - 0,5[CO]}{[CO] + [CO_2]},$$

$$\alpha = 1 + 0,42 \frac{2,5 - 0,5 \cdot 0,2}{8,5 + 0,2} = 1,12.$$

Вывод: коэффициент избытка воздуха для обогрева коксовых печей коксовым газом совершенно недостаточен. Требуется установить: 1,25–1,3.

Задача 5

Количество теплоты, переданное коксуемой шихте от отопительного газа, можно вычислить по формуле:

$$Q = Q_i \cdot V/M, \text{ кДж},$$

где Q_i – низшая теплота сгорания газа, кДж/нм³;

V – расход отопительного газа, нм³/ч;

M – масса коксуемой шихты, т.

Составляем пропорцию, исходя из того, что количество коксуемой шихты в обоих случаях равно произведению плотности насыпной массы на полезный объем камеры коксования – V_k .

При коксовании $750 \cdot V_k$ тонн шихты расходуют с машинной стороны 5700 нм³/ч и с коксовой стороны 6200 нм³/ч газа. При коксовании $780 \cdot V_k$ тонн шихты необходимо V нм³/ч газа:

$$\text{с машинной стороны: } V = \frac{5700 \cdot 780 \cdot V_k}{750 \cdot V_k} = 5928 \text{ нм}^3/\text{ч},$$

$$\text{с коксовой стороны: } V = \frac{6200 \cdot 780 \cdot V_k}{750 \cdot V_k} = 6448 \text{ нм}^3/\text{ч}.$$

Соответственно необходимо увеличить расход газа: с машинной стороны – $5928 - 5700 = 228$ нм³/ч, с коксовой стороны – $6448 - 6200 = 248$ нм³/ч.

Задача 6

Количество коксуемой шихты в первом случае $775 \text{ кг/нм}^3 \cdot V_k$, а во втором $760 \text{ кг/нм}^3 \cdot V_k$ (V_k – полезный объем камеры коксования), т. е. изменение произошло в

$$\frac{760 \cdot V_k}{775 \cdot V_k} = 0,9806.$$

Соответственно должно уменьшиться количество газа. Следовательно, $Q_2/Q_1 = 0,9806$ и расход отопительного газа должен быть:

$$V_2 = 0,9806 \cdot V_1 = 0,9806 \cdot 11220 = 11002 \text{ нм}^3/\text{ч}.$$

Таким образом, необходимо уменьшить общий расход на:

$$11220 - 11002 = 218 \text{ нм}^3/\text{ч}.$$

Задача 7

Определяем удельный расход тепла на коксование влажной шихты при изменении уровня влажности на 2%.

$$q_{\text{в.ш.}(11)} = q_{\text{в.ш.}(9)} + 33,5 \cdot \Delta W_t^r,$$

где ΔW_t^r – изменение влажности шихты.

$$q_{\text{в.ш.}(11)} = 2480 + 33,5 \cdot 2 = 2547 \text{ кДж/кг}.$$

Относительное изменение удельного расхода составляет:

$$\Delta q = \frac{2547 - 2480}{2480} \cdot 100 = 2,7\%.$$

Для сохранения готовности кокса на прежнем уровне необходимо увеличить расход газа на 2,7%, т. е. на

$$11000 \cdot 2,7/100 = 297 \text{ нм}^3/\text{ч},$$

т. е. установить его равным $11000 + 297 \approx 11300 \text{ нм}^3/\text{ч}$ с пропорциональным делением по сторонам. Температуры в контрольных вертикалах должны одновременно повыситься до уровня:

$$\text{с машинной стороны} - 1300 - (5 \div 7) \cdot 2 \approx 1310 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\text{с коксовой стороны} - 1345 - (5 \div 7) \cdot 2 \approx 1355 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Задача 8

Определяем удельный расход тепла на коксование влажной шихты при изменении уровня влажности с 11 до 7%:

$$q_{\text{в.ш.}(7)} = q_{\text{в.ш.}(11)} + 33,5 \cdot (7 - 11) = 2495 - 33,5 \cdot 4 = 2361 \text{ кДж/кг}.$$

Относительное изменение удельного расхода составляет:

$$\Delta q = \frac{2361 - 2495}{2495} \cdot 100 = -5,4\%.$$

Для сохранения готовности кокса на прежнем уровне необходимо уменьшить расход газа на 5,4%, т. е. на

$$12000 \cdot 5,4/100 = 648 \text{ нм}^3/\text{ч},$$

т. е. установить его равным $12000 - 648 \approx 12650 \text{ нм}^3/\text{ч}$ с пропорциональным делением по сторонам. Температуры в контрольных вертикалах должны одновременно повыситься до уровня:

с машинной стороны – $1295 - (5 \div 7) \cdot 4 \approx 1270 \text{ }^\circ\text{C}$,

с коксовой стороны – $1320 - (5 \div 7) \cdot 4 \approx 1295 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача 9

Для определения потребного увеличения расхода тепла на коксование и соответствующего расхода отопительного газа используем формулу:

$$Q = m \cdot c \cdot t,$$

где Q – количество теплоты, переданное коксу;

m – масса кокса;

c – теплоемкость кокса;

t – температура в осевой плоскости коксового пирога, $^\circ\text{C}$.

Для двух разных температур в осевой плоскости можно записать:

$$Q_1 = m_1 \cdot c_1 \cdot t_1 \text{ и } Q_2 = m_2 \cdot c_2 \cdot t_2.$$

Разделив левые и правые части уравнений, и с учетом того, что масса и теплоемкость кокса могут быть для решения данной практической задачи приняты постоянными, получим: $Q_1/Q_2 = t_1/t_2$ или $Q_2 = Q_1 \cdot t_2 / t_1$.

Для одной тонны кокса расход тепла на коксование равен удельному расходу, и поскольку в последнем выражении масса отсутствует, то:

$$Q_2 = 2520 \cdot 1050 / 1000 = 2646 \text{ кДж/кг.}$$

Расход отопительного газа требуется увеличить в

$$2646 / 2520 = 1,05 \text{ раз или на } 5\%.$$

Если расход газа на коксовую сторону по прибору составил 650 нм^3 , то его надо увеличить до $650 + 6,5 \cdot 5 = 683 \text{ нм}^3$.

На машинную сторону, допустим, расход составлял по прибору 590 нм^3 . Для увеличения температуры в осевой плоскости коксового пирога с 1000 до $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ расход газа по прибору надо установить $590 + 5,9 \cdot 5 = 620 \text{ нм}^3$.

Задача 10

Объем СО в продуктах сгорания $1,67 \cdot 0,012 = 0,02 \text{ нм}^3$. В доменном газе содержится 29% СО. Следовательно, не сгорело $\frac{0,02}{0,29} 100 = 6,9\%$ газа.

Задача 11

Дополнительный унос тепла связан с повышенной плотностью продуктов сгорания доменного газа по сравнению со случаем отопления коксовым газом.

Дополнительный унос тепла на 1 нм^3 газа составит $(2-1,85) \cdot 1,47 \cdot 300 = 65,5 \text{ кДж}$, или при теплоте сгорания газа 4000 кДж/нм^3 расход тепла увеличится на $65,5 \cdot 100 / 4000 = 1,64\%$.

Задача 12

Тогда $t_{i.\dot{\epsilon}} = \frac{23100}{6,79 \cdot 1,68} = 2020 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Задача 13

Находим по формуле

$$t_{i.\dot{\epsilon}} = \frac{Q_i}{V_{i\dot{a}} \cdot \tilde{n}_{i\dot{a}}}.$$

Для доменного газа:

$$t_{i.\dot{\epsilon}} = \frac{4070}{1,64 \cdot 1,66} = 1490 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

для коксового газа:

$$t_{i.\dot{\epsilon}} = \frac{17700}{5,05 \cdot 1,68} = 2090 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Таким образом, $t_{i.\dot{\epsilon}}$ коксового газа на $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ выше, чем доменного.

Задача 14

Тогда $t_{\dot{\epsilon}} = \frac{17700 + 7800}{5,05 \cdot 1,72 + 1,28 \cdot 1,55} = 2390 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

При таком же избытке воздуха, но без подогрева калориметрическая температура горения составила бы только $1655 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Задача 15

$$\text{Получим } t_{\text{е}} = \frac{4070 + 1270 + 1550}{1,64 \cdot 1,76 + 0,16 \cdot 1,55} = 2200^\circ\text{C}.$$

Таким образом даже при подогреве доменного газа и воздуха до 1000°C калориметрическая температура горения ниже, чем при обогреве коксовым газом, когда подогревается только воздух. Этим обусловлена необходимость подогрева доменного газа.

Задача 16

$$\text{Тогда } Q_{\text{дис}} = 10800 \cdot 0,07 \cdot 0,05 + 12650 \cdot 0,402 \cdot 0,1 = 546 \text{ кДж/нм}^3.$$

$$t_{\text{о}} = \frac{4070 + 1270 + 1550 - 546}{1,64 \cdot 1,76 + 0,16 \cdot 1,55} = 2020^\circ\text{C}.$$

Теоретическая температура горения получилась ниже калориметрической на 180°C . В зависимости от коэффициента избытка воздуха и температуры подогрева эта разница составляет $100\text{--}200^\circ\text{C}$.

Задача 17

$$\text{Используя формулу } q_{\text{а.о.}} = q_{\text{н.о.}} \cdot \frac{100 - W}{100} + q_W \cdot \frac{W}{100},$$

найдем

$$q_{\text{н.о.}} = \frac{2700 - 58 \cdot 10}{100 - 10} 100 = 2360 \text{ кДж/кг}.$$

Задача 18

$$\text{Используя формулу } q_{\text{г.д.}} = q_{\text{а.о.}} + 33(8 - W),$$

найдем

$$q_{\text{г.д.}} = 2640 + 33(8 - 10) = 2570 \text{ кДж/кг}.$$

Задача 19

$$\text{Согласно уравнению } P_1 = P_2 \pm H \cdot g(\rho_{\text{а}} - \rho_{1-2}) + \Delta P_{1-2}$$

находим:

$$\Delta P_{1-2} = -50 + 35 + 2,5 \cdot 9,81 \left(\frac{1,29 \cdot 273}{273 + 15} - \frac{1,29 \cdot 273}{273 + 580} \right) = 5 \text{ Па}.$$

Задача 20

$$\text{Согласно уравнению } P_1 = P_2 \pm H \cdot g(\rho_{\text{а}} - \rho_{1-2}) + \Delta P_{1-2}.$$

находим:

$$\Delta P_{4-5} = -80 + 110 - 2,5 \cdot 9,81 \left(\frac{1,29 \cdot 273}{273 + 15} - \frac{1,29 \cdot 273}{273 + 795} \right) = 8 \text{ Ё ¤}.$$

Задача 21

Воспользуемся уравнением для участков 2–3 и 3–4:

$$P_2 = P_3 \pm H_{2-3} \cdot g(\rho_a - \rho_{2-3}) + \Delta P_{2-3};$$

$$P_3 = P_4 \pm H_{3-4} \cdot g(\rho_a - \rho_{3-4}) + \Delta P_{3-4}.$$

Геометрические напоры на участках 2–3 и 3–4 можно считать равными, т. к. $H_{2-3} = H_{3-4}$ и $\rho_{2-3} \approx \rho_{3-4}$. В задачах 11–12 при значительно большей разности температур разность геометрических напоров составила всего 2 Па.

Таким образом, приняв геометрические напоры равными и сложив оба уравнения, получим:

$$P_2 = P_4 + \Delta P_{2-4} \text{ и } \Delta P_{2-4} = P_2 - P_4.$$

Следовательно, сопротивление верхней части отопительной системы равно перепаду давлений в «глазках» регенераторов.

Задача 22

Сопротивление до изменения давления:

$$\Delta P_{2-4} = P_2 - P_4 = -35 + 80 = 45 \text{ Па}.$$

Согласно уравнению $\Delta P = k' V^2 \rho T$ сопротивления после изменения давления составят $\Delta P'_{2-4} = \Delta P_{2-4} \cdot 1,1^2 = 54 \text{ Ё ¤}$.

Таким образом сопротивления возросли на 21%, а потребное давление $P'_4 = P_2 - \Delta P'_{2-4} = -35 - 54 = -89 \text{ Ё ¤}$, т. е. исходное давление должно быть снижено на 9 Па.

Задача 23

Согласно уравнению $\Delta P_2 = \Delta P_1 (\tau_1 / \tau_2)^2$

$$\Delta P_2 = \Delta P_1 \cdot (16/14)^2 = 1,3 \Delta P_1,$$

т. е. сопротивления возрастут на 30%.

Задача 24

Сопротивление верхней части отопительной системы до изменения давления:

$$\Delta P_{2-4} = P_2 - P_4 = -40 + 100 = 60 \text{ Ё ¤}.$$

Сопротивление после увеличения коэффициента избытка воздуха:

$$\Delta P'_{2-4} = \Delta P_{2-4} (\alpha' / \alpha)^2 = 60(1,2/1,08)^2 = 73 \text{ Ё ¤}.$$

Давление, которое следует установить в «глазке» регенератора на нисходящем потоке:

$$P'_4 = P_2 - \Delta P_{2-4} = -40 - 73 = -113 \text{ Па}.$$

Задача 25

В первом случае разность высот составляет 7,5 м, во втором – 4 м; температура наружного воздуха – 20 °С, в туннеле – 25 °С. Плотность воздуха при нормальных условиях $\rho_v = 1,29 \text{ кг/м}^3$, плотность коксового газа при фактических условиях $\rho = 0,4 \text{ кг/м}^3$. Т. к. в соединительных трубках движение газа отсутствует, их сопротивление не учитывается.

Из уравнения $P_1 = P_2 \pm H \cdot g(\rho_a - \rho_{1-2}) + \Delta P_{1-2}$ находим:

$$P_2 = P_1 - H_{2-1} \cdot g(\rho_a - \rho);$$

$$P_1 = 10 + 7,5 \cdot 9,81(1,29 \cdot 273/293 - 0,4) = 69 \text{ Па};$$

$$P_2 = P_3 - H_{2-3} \cdot g(\rho_a - \rho);$$

$$P_3 = 10 - 4 \cdot 9,81(1,29 \cdot 273/298 - 0,4) = -21 \text{ Па}.$$

Задача 26

Для системы каналов по формуле $P_1 = P_n + \sum H[g(\rho_a - \rho)]_{1-n} + \sum \Delta P_{1-n}$:

$$P_0 = P_m + \sum H[g(\rho_a - \rho)]_{0-m} + \Delta P_{0-m};$$

$$P_m = P_0 - \sum H[g(\rho_a - \rho)]_{0-m} - \Delta P_{0-m}.$$

На входе в отопительную систему $P_0 = 0$.

Значит, $P_m = -\sum H[g(\rho_a - \rho)]_{0-m} - \Delta P_{0-m}$, т. е. давление у основания дымовой трубы равно алгебраической сумме сопротивлений и геометрических напоров для всей отопительной системы, взятых с обратными знаками. Это давление и представляет собой потребную тягу, которую должна обеспечить дымовая труба.

Для определения высоты дымовой трубы H_{m-n} воспользуемся уравнением:

$$P_m = P_n - H_{m-n} \cdot g(\rho_a - \rho_{m-n}) + \Delta P_{m-n}; \quad P_n \approx 0.$$

Отсюда:

$$H_{m-n} = \frac{-P_m + \Delta P_{m-n}}{g(\rho_a - \rho_{m-n})} = \frac{\Delta P_{0-m} + \sum [Hg(\rho_a - \rho)]_{0-m} + \Delta P_{m-n}}{g(\rho_a - \rho_{m-n})}.$$

Таким образом при расчете высоты дымовой трубы к требуемому у основания трубы разрежению следует добавить сопротивление, возникающее в самой дымовой трубе.

Задача 27

При решении задачи используем формулы:

$$P = \sum P_i + P_a,$$

$$P_a = H \cdot g \left(\rho_{\text{в}} \frac{\dot{O}_0}{\dot{O}_a} - \rho_{\text{г,газ}} \frac{\dot{O}_0}{\dot{O}_{\text{газ}}} \right),$$

где P – давление на данном уровне отопительной системы, Па;

$\Delta P_{\text{п}}$ – сумма потерь давления на данном участке, Па;

$P_{\text{г}}$ – гидростатический напор на высоте H от I до II горизонта;

g – ускорение силы тяжести, равное $9,81 \text{ м/с}^2$;

$\rho_{\text{ов}}$ и $\rho_{\text{о, газ}}$ – плотность воздуха и продуктов горения при нормальных условиях;

$T_{\text{в}}$ и $T_{\text{газ}}$ – средние температуры воздуха и газа, К;

T_0 – температура воздуха и газа (продуктов горения) при 0°C , (273 К).

Находим значение гидростатического напора при температуре 10°C и 30°C .

На восходящем потоке:

$$P_{a_{10}} = 2,7 \cdot 9,81 \cdot (1,293 \cdot 273/283 - 1,293 \cdot 273/863) = 22,3 \text{ Ё } (2,27 \text{ мм вод. ст.});$$

$$P_{a_{30}} = 2,7 \cdot 9,81 \cdot (1,293 \cdot 273/303 - 1,293 \cdot 273/863) = 19,9 \text{ Ё } (2,03 \text{ мм вод. ст.}).$$

На нисходящем потоке:

$$P_{a_{10}} = 2,7 \cdot 9,81 \cdot (1,293 \cdot 273/283 - 1,22 \cdot 273/1100) = 25,2 \text{ Ё } (2,57 \text{ мм вод. ст.});$$

$$P_{a_{30}} = 2,7 \cdot 9,81 \cdot (1,293 \cdot 273/303 - 1,22 \cdot 273/1100) = 22,8 \text{ Ё } (2,32 \text{ мм вод. ст.}),$$

где 1,293 – плотность воздуха при 0°C ;

1,22 – плотность продуктов горения коксового газа (обычно в пределах 1,22–1,23 кг/нм³).

Находим потери давления $\Delta P_{\text{п}}$ при температуре воздуха 10°C :

на восходящем потоке $\Delta P_{\text{п}} = 55,9 - 22,3 = 33,6 \text{ Па}$;

на нисходящем потоке $\Delta P_{\text{п}} = 72,6 - 25,2 = 47,4 \text{ Па}$.

Так как потери давления при постоянном расходе не должны зависеть от изменения гидравлических условий прохождения воздуха, то есть $\Delta P_{\text{п}}$ не изменяется, то новое, требуемое разрежение в глазках регенераторов на восходящем и нисходящем потоках должно быть равно:

на восходящем потоке $P = 33,6 + 19,9 = 53,5 \text{ Па}$ (5,45 мм вод. ст.);

на нисходящем потоке $P = 47,4 + 22,8 = 70,2$ Па (7,16 мм вод. ст.).

Разность давлений между верхней частью регенераторов, работающих на восходящем и нисходящем потоках (что обеспечивает количество воздуха, поступающего в отопительную систему) равно при температуре 10 °С:

$$72,6 - 55,9 = 16,7 \text{ Па};$$

при температуре 30 °С:

$$70,2 - 53,5 = 16,7 \text{ Па}.$$

Таким образом количество воздуха не изменится.

Для того, чтобы снизить разрежение на восходящем потоке с 55,9 Па (5,7 мм вод. ст.) до 53,5 Па (5,5 мм вод. ст.) следует раскрыть пластины на входном отверстии газовоздушного клапана воздушного регенератора, т. е. уменьшить сопротивление прохождению воздуха.

Библиографический список

1. Вирозуб, И.В., Лейбович, Р.Е. Расчеты коксовых печей и процессов коксования / И.В. Вирозуб, Р.Е. Лейбович. – Киев : «Вища школа», 1970. 248 с.
2. Вирозуб, И.В. Расчеты коксовых печей и процессов коксования с применением ЭВМ / И.В. Вирозуб. – Киев : «Вища школа», 1989. 303 с.
3. Дигуров, Н.Г. Проектирование и расчет аппаратов технологии горючих ископаемых : учеб. пособие для ВУЗов / Н.Г. Дигуров. – М. : Химия, 1993. 285 с.
4. Кауфман, А.А., Харлампович, Г.Д. Технология коксохимического производства : учеб. пособие для ВУЗов / А.А. Кауфман, Г.Д. Харлампович. – Екатеринбург : ВУХИН – НКА, 2004. 287 с.
5. Павлов, К.Ф., Романков, П.Г. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков. – М. : Химия, 1970. 624 с.
6. Чистяков, А.Н. Технология коксохимического производства в задачах и вопросах / А.Н. Чистяков – М. : Metallurgia, 1983. 296 с.
7. Шатоха, И.З. Усреднение углей и качество доменного кокса / И.З. Шатоха, Б.В. Боклан, Б.И. Мениович. – Киев : Техніка, 1983. 103 с.
8. Эйдельман, Е.Я. Основы технологии коксования углей / Е.Я. Эйдельман. Киев ; Донецк : Вища школа, Головное изд-во, 1985. 191 с.
9. Справочник коксохимика. М. : Metallurgia, т. 1, 1964, 490 с. ; т. 2, 1965, 288 с., т. 5. 454 с.

Приложение

Таблица 1

Обозначение показателей качества твердого топлива

Показатель	Обозначение показателя	Индекс для обозначения состояния топлива				
		рабочего, r	аналитического, a	сухого, d	сухого беззольного, daf	органической массы, o
1 Общая влага	W_t	W_t^r	—	—	—	—
1.1 Внешняя влага	W_{ex}	W_{ex}^r	—	—	—	—
1.2 Влага воздушно-сухого топлива	W_h	—	—	—	—	—
2 Влага аналитической пробы	W^a	—	W^a	—	—	—
3 Максимальная влагоемкость	W_{max}	—	—	—	—	—
4 Гидратная влага	W_{MM}	W_{MM}^r	W_{MM}^a	W_{MM}^d	—	—
5 Минеральная масса (MM)	(MM)	(MM) r	(MM) a	(MM) d	—	—
6 Диоксид углерода из карбонатов угля (CO ₂)	(CO ₂)	(CO ₂) r	(CO ₂) a	(CO ₂) d	—	—
7 Зольность	A	A^r	A^a	A^d	—	—
8 Выход летучих веществ	V V_c	V^r V_c^r	V^a V_c^a	V^d V_c^d	V^{daf} V_c^{daf}	—
8.1 Выход летучих веществ горючих	V_{nc}	V_{nc}^r	V_{nc}^a	V_{nc}^d	V_{nc}^{daf}	—
8.2 Выход летучих веществ негорючих	V_v	V_v^r	V_v^a	V_v^d	V_v^{daf}	—
9 Выход летучих веществ (объемный)	(NV)	(NV) r	(NV) a	(NV) d	(NV) daf	—
10 Нелетучий остаток	C_r	C_r^r	C_r^a	C_r^d	C_r^{daf}	—
11 Нелетучий углерод (расчетная величина)	Q_s	Q_s^r	Q_s^a	Q_s^d	Q_s^{daf}	Q_s^o
12 Высшая теплота сгорания	Q_s^{af}	—	—	—	—	—
12.1 Высшая теплота сгорания влажного беззольного топлива (расчетная величина)	Q_i	Q_i^r	Q_i^a	Q_i^d	Q_i^{daf}	Q_i^o
13 Низшая теплота сгорания (расчетная						

величина)	C		C ^a	C ^d	—	—
14 Общий углерод	C _o	C ^r	C _o ^a	C _o ^d	C _o ^{daf}	C _o ^o
14.1 Органический углерод (расчетная величина)	C _{MM}	C _o ^r C _{MM} ^r	C _{MM} ^a	C _{MM} ^d	—	—
14.2 Неорганический углерод	H	H ^r	H ^a	H ^d	—	—
	H _o	H _o ^r	H _o ^a	H _o ^d	H _o ^{daf}	H _o ^o
15 Общий водород						
15.1 Органический водород (расчетная величина)	H _{MM}	H _{MM} ^r	H _{MM} ^a	H _{MM} ^d	—	—
15.2 Неорганический водород (расчетная величина)	N	N ^r	N ^a	N ^d	N ^{daf}	N ^o
	O	O ^r	O ^a	O ^d	O ^{daf}	O ^o
16 Азот	O _d	O _d ^r	O _d ^a	O _d ^d	O _d ^{daf}	O _d ^o
17 Кислород (определяемая величина)	S _t	S _t ^r	S _t ^a	S _t ^d	—	—
18 Кислород (расчетная величина)	S _{MeS}	S _{MeS} ^r	S _{MeS} ^a	S _{MeS} ^d	—	—
	S _p	S _p ^r	S _p ^a	S _p ^d	—	—
19 Общая сера	S _{SO4}	S _p ^r	S _{SO4} ^a	S _{SO4} ^d	—	—
20 Сульфидная сера	S _{el}	S _{SO4} ^r	S _{el} ^a	S _{el} ^d	—	—
21 Пиритная сера	S _o	S _{el} ^r	S _o ^a	S _o ^d	S _o ^{daf}	S _o ^o
22 Сульфатная сера		S _o ^r				
23 Элементарная сера	S _c	S _c ^r	S _c ^a	S _c ^d	S _c ^{daf}	S _c ^o
24 Органическая сера (расчетная величина)	S _{MM}	S _{MM} ^r	S _{MM} ^a	S _{MM} ^d	—	—
25 Горючая сера	S _A	S _A ^r	S _A ^a	S _A ^d	—	—
26 Сера минеральной массы	S _{vsK}	S _{vsK} ^r	S _{vsK} ^a	S _{vsK} ^d	S _{vsK} ^{daf}	—
27 Сера золы	S _{sK}	S _{sK} ^r	S _{sK} ^a	S _{sK} ^d	—	—
28 Летучая сера (полукоксования)	S _{vK}	S _{vK} ^r	S _{vK} ^a	S _{vK} ^d	S _{vK} ^{daf}	—
29 Сера в полукоксе	S _K	S _K ^r	S _K ^a	S _K ^d	—	—
30 Летучая сера (коксование)	S _b	S _b ^r	S _b ^a	S _b ^d	—	—
31 Сера в коксе	P	P ^r	P ^a	P ^d	—	—
32 Сера по смыву бомбы	Cl	Cl ^r	Cl ^a	Cl ^d	—	—
	As	As ^r	As ^a	As ^d	—	—
33 Фосфор	B	B ^r	B ^a	B ^d	B ^{daf}	B ^o
34 Хлор	B _w	B _w ^r	B _w ^a	B _w ^d	B _w ^{daf}	B _w ^o
35 Мышьяк						
36 Выход толуольного	B _r		B _r ^a	B _r ^d	B _r ^{daf}	B _r ^o

экстракта		B_r^r				
37 Содержание восков в толуольном экстракте	$(HA)_t$		$(HA)_t^a$	$(HA)_t^d$	$(HA)_t^{daf}$	$(HA)_t^o$
38 Содержание смол в толуольном экстракте (ацетоновый экстракт)	$(HA)_f$	$(HA)_t^r$ $(HA)_f^r$	$(HA)_f^a$	$(HA)_f^d$	$(HA)_f^{daf}$	$(HA)_f^o$
39 Гуминовые кислоты	d_a		—	d_a^d	—	—
40 Гуминовые кислоты свободные	d_r	d_a	—	d_r^d	—	—
41 Кажущаяся плотность	P_r (UP) (BD)	— (UP) (BD)	— (UP) ^a (BD) ^a	P_r^d — —	— — —	— — —
42 Действительная плотность	t_s	—	—	—	—	—
43 Пористость	t_A	—	—	—	—	—
44 Удельная поверхность	t_B	—	—	—	—	—
45 Насыпная плотность		—	—	—	—	—
46 Плавкость золы	t_C	—	—	—	—	—
46.1 Температура спекания	$V_{A(t)}$	—	—	—	—	—
46.2 Температура начала деформации плавления	t_f	—	—	—	—	—
46.3 Температура плавления	Al	Al	—	—	—	—
46.4 Температура жидкоплавкого состояния	HCl $K_{ло}$	HCl $K_{ло}$	— —	— —	— —	— —
47 Вязкость плавленной золы	R_{CO_2}	—	—	—	—	—
48 Температура возгорания	R_{O_2}	—	—	—	—	—
49 Индекс абразивности	R_{H_2O}	—	—	—	—	—
50 Индекс размолоспособности	R	—	—	—	—	—
50.1 Метод Хардгров	$\check{R}_r$	—	—	—	—	—
50.2 Метод ВТИ		—	—	—	—	—
51 Реакционная способность по CO_2		—	—	—	—	—
52 Реакционная способность по O_2	$\check{R}_{max}$	—	—	—	—	—
53 Реакционная спо-		—	—	—	—	—

способность по H ₂ O						
54 Показатель отражения витринита	$\check{R}_{r,a}$	—	—	—	—	—
54.1 Среднее значение произвольного показателя отражения витринита (в иммерсии)	$\check{R}_{r,max}$	—	—	—	—	—
54.2 Среднее значение максимального показателя отражения витринита (в иммерсии)	A_R	—	—	—	—	—
54.3 Среднее значение произвольного показателя отражения витринита (в воздухе)	H V_t I	—	—	—	—	—
54.4 Среднее значение максимального показателя отражения витринита (в воздухе)	L S_v RI	—	—	—	—	—
55 Показатель анизотропии отражения	SI	—	SI	—	—	—
56 Мацеральный состав						
56.1 Гуминит						
56.2 Витринит	a	—	a	—	—	—
56.3 Инертинит						
56.4 Липтинит	b	—	b	—	—	—
56.5 Семивитринит						
57 Индекс спекаемости по Рогу	t_I	—	t_I	—	—	—
58 Индекс свободного вспучивания	t_{II}	—	t_{II}	—	—	—
59 Дилатометрические показатели по Одибери-Арну	t_{III} GK	—	t_{III} GK	—	—	—
59.1 Максимальное сжатие						
59.2 Максимальное расширение	x	—	x	—	—	—
59.3 Температура начала пластического состояния	y	—	y	—	—	—
59.4 Температура максимального сжатия						

59.5 Температура максимального расширения	t_1	—	t_1	—	—	—
60 Тип кокса по Грей-Кингу	$t_{\max}$	—	$t_{\max}$	—	—	—
61 Пластометрические показатели по Сапожникову	t_3	—	t_3	—	—	—
61.1 Пластометрическая усадка	$F_{\max}$	—	$F_{\max}$	—	—	—
61.2 Толщина пластического слоя	$P_{\max}$	—	$P_{\max}$	—	—	—
62 Показатели текучести в пластическом состоянии по Гизелеру	(sK) (sK) _c	(sK) ^r (sK) _c ^r	(sK) ^a (sK) _c ^a	(sK) ^d (sK) _c ^d	— (sK) _c ^{daf}	— —
62.1 Температура начала пластического состояния	T_{sK} W_{sK}	T_{sK}^r W_{sK}^r	T_{sK}^a W_{sK}^a	T_{sK}^d W_{sK}^d	T_{sK}^{daf} W_{sK}^{daf}	— —
62.2 Температура максимальной текучести	G_{sK} P_{sK}	G_{sK}^r P_{sK}^r	G_{sK}^a P_{sK}^a	G_{sK}^d P_{sK}^d	G_{sK}^{daf} P_{sK}^{daf}	— —
62.3 Температура затвердевания						
62.4 Максимальная текучесть	K K _c	K ^r K _c ^r	K ^a K _c ^a	K ^d K _c ^d	— K _c ^{daf}	— —
63 Давление вспучивания	T _K W _K	K _c ^r T _K ^r W _K ^r	T _K ^a W _K ^a	T _K ^d W _K ^d	T _K ^{daf} W _K ^{daf}	— —
64 Выход продуктов полукоксования	G _K	G _K ^r	G _K ^a	G _K ^d	G _K ^{daf}	—
64.1 Полукокс	P _K	P _K ^r	P _K ^a	P _K ^d	P _K ^{daf}	—
64.2 Полукокс (беззольный)						
64.3 Безводная смола	M ₄₀	—	—	—	—	—
64.4 Пирогенетическая вода	I ₄₀	M ₄₀	—	—	—	—
64.5 Газ	M ₁₀	I ₄₀	—	—	—	—
64.6 Пек		M ₁₀	—	—	—	—
65 Выход продуктов коксования	I ₁₀	I ₁₀	—	—	—	—
65.1 Кокс	ShI	—	—	—	—	—
65.2 Кокс (беззольный)		ShI	—	—	—	—
65.3 Безводная смола	RC	—	—	—	—	—
65.4 Пирогенетическая вода		RC	—	—	—	—

65.5 Газ						
65.6 Пек						
66 Механические свойства кокса						
66.1 Прочность по МИКУМ						
66.2 Прочность по Ир-сид						
66.3 Истираемость по МИКУМ						
66.4 Истираемость по Ир-сид						
66.5 Прочность на сбрасывание						
66.6 Прочность на сжатие						

Примечания:

1. Знак «—» означает, что показатели в соответствующем состоянии топлива не могут быть определены или рассчитаны.

2. Для обозначения химических элементов, не приведенных в таблице 1, определяемых в топливе и золе, используют принятые общие обозначения, при этом для элементов, определяемых в золе, прибавляют нижний индекс *A*.

3. Показатель плавкости золы (46) должен быть увязан с показателями рабочей атмосферы, например: $t_{в(ox)}$ — температура плавления в окислительной атмосфере; $t_{в(r)}$ — в восстановительной атмосфере; $t_{в(or)}$ — в полувосстановительной атмосфере.

4. При обозначении вязкости плавленной золы (47) в скобках указывают температуру, при которой определяли вязкость, например: $V_{A(1400)}$ — вязкость золы при 1400 °С.

Таблица 2

Состояние топлива	Формула пересчета в состояние топлива				
	r	a	d	daf	o
r	1	$\frac{100 - W^a}{100 - W_t^r}$	$\frac{100}{100 - W_t^r}$	$\frac{100}{100 - (W_t^r + A^r)}$	$\frac{100}{100 - (W_t^r - MM^r)}$
a	$\frac{100 - W_t^r}{100 - W^a}$	1	$\frac{100}{100 - W^a}$	$\frac{100}{100 - (W^a + A^a)}$	$\frac{100}{100 - (W^a - MM^a)}$
d	$\frac{100 - W_t^r}{100}$	$\frac{100 - W^a}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^d}$	$\frac{100}{100 - MM^d}$
daf	$\frac{100 - (W_t^r + A^r)}{100}$	$\frac{100 - (W^a + A^a)}{100}$	$\frac{100 - A^d}{100}$	1	$\frac{100 - A^d}{100 - MM^d}$
o	$\frac{100 - (W_t^r + MM^r)}{100}$	$\frac{100 - (W^a + MM^a)}{100}$	$\frac{100 - MM^d}{100}$	$\frac{100 - MM^d}{100 - A^d}$	1

Таблица 3

Состояние топлива	Формулы пересчета в состояние топлива				
	r	a	d	daf	o
r	1	$\frac{100 - W^a}{100 - W_t^r} \cdot (Q_i^r + \gamma \cdot W_t^r) - \gamma \cdot W^a$	$\frac{100 \cdot (Q_i^r + \gamma \cdot W_t^r)}{100 - W_t^r}$	$\frac{100 \cdot (Q_i^r + \gamma \cdot W_t^r)}{100 - (W_t^r + A^r)}$	$\frac{100 \cdot (Q_i^r + \gamma \cdot W_t^r)}{100 - (W_t^r + MM^r)}$
a	$\frac{100 - W_t^r}{100 - W^a} \cdot (Q_i^a + \gamma \cdot W^a) - \gamma \cdot W_t^r$	1	$\frac{100 \cdot (Q_i^a + \gamma \cdot W^a)}{100 - W^a}$	$\frac{100 \cdot (Q_i^a + \gamma \cdot W^a)}{100 - (W^a + A^a)}$	$\frac{100 \cdot (Q_i^a + \gamma \cdot W^a)}{100 - (W^a + MM^a)}$

Таблица 4

Состав отопительных газов, %

Компонент	Газ			
	коксовый	доменный	обезводороженный коксовый	генераторный
H ₂	60,0	2,8	5,5	9,0
CH ₄	25,0	0,2	52,0	1,0
C _m H _n	2,2	-	4,0	-
CO	6,0	29,0	12,0	28,0
CO ₂	2,4	11,0	0,8	5,0
O ₂	0,4	0,3	1,0	0,4
N ₂	4,0	56,7	24,7	56,6

Примечание: C_mH_n – смесь различных углеводородов. Примерный состав смеси, %:
C₂H₄ – 83; C₃H₆ – 15; C₆H₆ – 2. Ее общая расчетная формула имеет вид C₂₋₂₃H₄₋₃₄.

Таблица 5

Состав продуктов сгорания коксового газа

Компоненты газа	Состав газа		Состав продуктов сгорания, нм ³		
	%	нм ³	H ₂ O	CO ₂	N ₂
H ₂	60,0	0,600	0,600	-	-
CH ₄	25,0	0,250	0,500	0,250	-
C _m H _n	2,2	0,022	0,049	0,048	-
CO	6,0	0,060	-	0,060	-
O ₂	2,4	0,024	-	0,024	-
CO ₂	0,4	0,004	-	-	-
N ₂	4,0	0,040	-	-	0,04
H ₂ O с газом	-	-	0,024	-	-
H ₂ O с воздухом	-	-	0,076	-	-
N ₂ с воздухом	-	-	-	-	3,38
Всего	100,0	1,000	1,249	0,82	3,42

Таблица 6

Состав продуктов сгорания доменного газа

Компоненты газа	Состав газа		Состав продуктов сгорания, нм ³		
	%	нм ³	H ₂ O	CO ₂	N ₂
H ₂	2,8	0,028	0,028	-	-
CH ₄	0,2	0,002	0,004	0,002	-
CO	29,0	0,290	-	0,290	-
O ₂	0,3	0,003	-	-	-
CO ₂	11,0	0,110	-	0,110	-
N ₂	56,7	0,567	-	-	0,567
H ₂ O с газом	-	-	0,024	-	-
H ₂ O с воздухом	-	-	0,014	-	-
N ₂ с воздухом	-	-	-	-	0,602
Всего:	100,0	1,000	0,070	0,402	1,169

Таблица 7

Расчетные показатели сгорания газов

Показатель	Коксовый газ	Доменный газ
Теплота сгорания, кДж/нм ³	17700	4070
Количество газа, необходимое для получения 4000 кДж,	0,23	0,98
Количество воздуха:		
на нм ³ газа, нм ³ ;	4,26	0,76
на 4000 кДж, нм ³ .	0,96	0,75
Количество продуктов сгорания:		
на нм ³ газа, нм ³ ;	5,05	1,64
на 4000 кДж, нм ³ .	1,15	1,61

Таблица 8

Значение средних теплоемкостей продуктов сгорания и воздуха
в интервале температур от 0 до t °С, кДж/(нм³·К)

t, °С	Средняя теплоемкость продуктов горения газов при α = 1		Средняя теплоемкость воздуха
	Коксового, природного	Доменного, генераторного	
0–200	1,38	1,43	1,30
200–400	1,43	1,47	1,32
400–700	1,47	1,51	1,34
700–1000	1,51	1,55	1,38
1000–1200	1,55	1,59	1,43
1200–1500	1,59	1,64	1,47
1500–1800	1,64	1,68	1,49
1800–2100	1,68	1,72	1,51
2100–2400	1,72	1,76	1,55
2400–2700	1,76	1,80	1,59

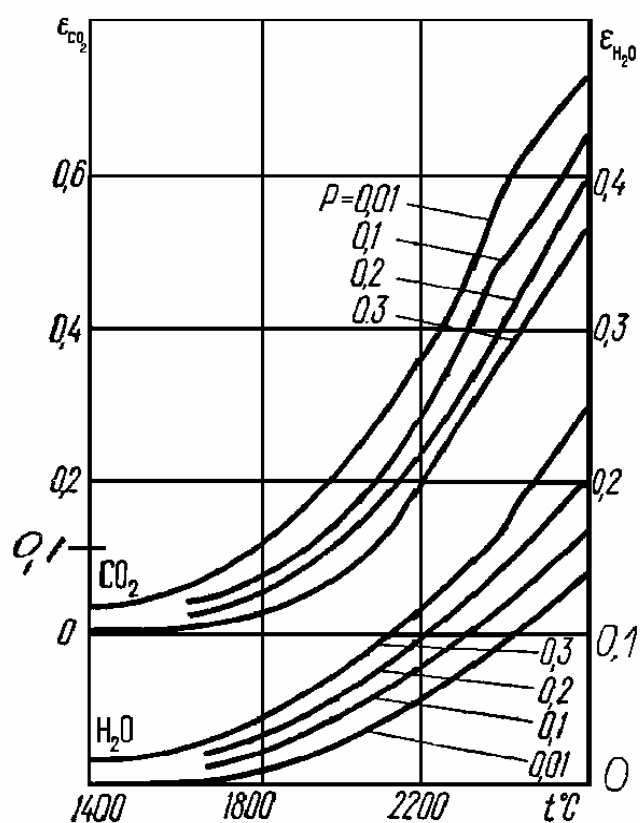


Рис. 2. График для определения диссоциации CO_2 и H_2O (цифры у кривых – парциальные давления p)

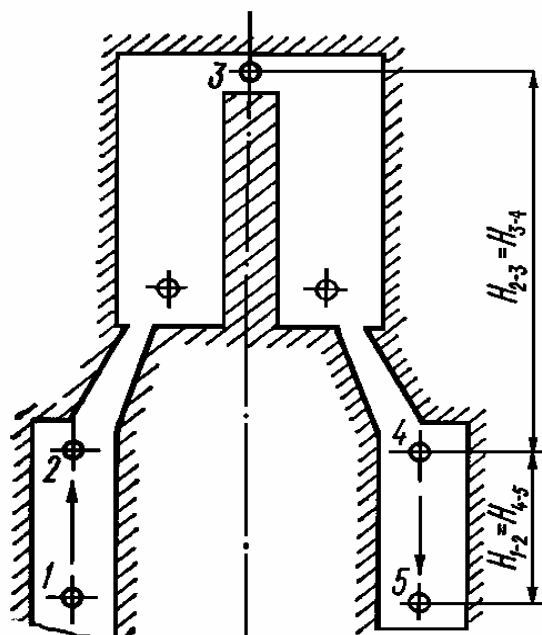


Рис. 3. Движение газов в отопительной системе коксовых печей

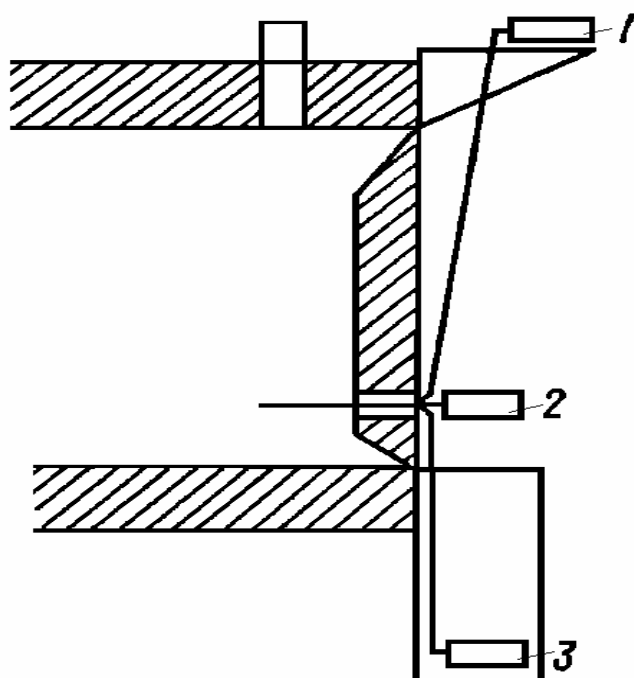


Рис. 4. Схема замера давлений в камере коксования: 1 – верх батареи; 2 – рабочая площадка; 3 – туннель

Учебное электронное текстовое издание

А.А. Кауфман, В.Д. Глянченко, С.А. Косоголов

**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
СОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ КОКСОВАНИЯ
СБОРНИК ПРИМЕРОВ И ЗАДАЧ**

Редактор *К.Б. Позднякова*
Компьютерная верстка *А.А. Гребенищикова*

**Рекомендовано РИС ГОУ ВПО УГТУ-УПИ
Разрешен к публикации 18.04.06
Электронный формат – PDF
Формат 60×90 1/8**

**Издательство ГОУ ВПО УГТУ-УПИ
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19
e-mail: sh@uchdep.ustu.ru**

**Информационный портал
ГОУ ВПО УГТУ-УПИ
<http://www.ustu.ru>**