

ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 622.278.06: 662.746.6

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-3-90-99

РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА ПРОЦЕССА СЖИГАНИЯ УГЛЯ В ПОДЗЕМНЫХ УСЛОВИЯХ ПРИ ДЕФИЦИТЕ НЕОБХОДИМЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

ЗАКОРШМЕННЫЙ И. М., КУБРИН С. С., ЯНЧЕНКО Г. А.

При переходе горных работ на большие глубины, в более сложные горно-геологические условия, возрастает риск аварий, связанных с простоями, поломкой или утратой горно-технологического оборудования, возможными травмами и человеческими жертвами. В последние годы выполняется «Комплексная программа поэтапной ликвидации убыточных шахт, расположенных на территории городов Прокопьевска, Киселевска, Анжеро-Судженска, и переселения жителей с подработанных территорий». В Программу попали 12 шахт, при этом некоторые из них являются градообразующими. Представляется перспективным для отработки оставшихся запасов угля использовать технологии, предусматривающие термическую переработку угля в месте его залегания с помощью подземной газификации. Экономическая эффективность работы подземного газогенератора зависит от многих факторов: геометрических, технологических, технических параметров; марки угля и его физико-химических свойств, которые в той или иной мере характеризуют показатели материального баланса процесса сжигания угля в подземных условиях. Для конкретного вида угля разработаны подходы к расчету показателей материального баланса при сжигании угля. Однако достоверные данные о некондиционных запасах и запасах в маломощных пластах практически отсутствуют. Статья посвящена разработке схемы расчета показателей материального баланса процесса сжигания угля в подземных условиях, когда отсутствует требуемый объем исходных данных. Проведен анализ существующих подходов, выявлены их достоинства и недостатки. Получены соотношения, связывающие объем сухого воздуха, объем продуктов сгорания, объем паров воды с теплотой сгорания угля и с учетом марочного состава. Анализ точности расчетов объема продуктов сгорания по полученной формуле на основе данных натуральных экспериментов показал, что средняя погрешность составляет 1,5 %, а наибольшая не превышает 5 %. Полученная схема может быть использована при расчете показателей материального баланса процесса сжигания угля в подземных условиях для ликвидируемых шахт согласно «Комплексной программе».

Ключевые слова: подземный газогенератор; подземное сжигание угля; материальный баланс сжигания угля; объем воздуха для сжигания; элементный состав угля; объем продуктов сгорания; влагосодержание; температура сгорания; объем паров воды.

В настоящее время в России значительная часть добычи угля осуществляется подземным способом. Переход на глубокие горизонты, большая газоносность пластов, высокая нарушенность, пожароопасность, выбросоопасность и обводненность месторождений сопровождается снижением технико-экономических

Закоршменный Иосиф Михайлович – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник. 111020, г. Москва, Крюковский туп., 4, Институт проблем комплексного освоения недр РАН. E-mail: i_zakorshmenniy@mail.ru

Кубрин Сергей Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией. 111020, г. Москва, Крюковский туп., 4, Институт проблем комплексного освоения недр РАН. E-mail: s_kubrin@mail.ru

Янченко Геннадий Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля. 119991, г. Москва, Ленинский просп., 4, Горный институт Национального исследовательского технологического университета «МИСиС». E-mail: yanchenkoga@kmail.ru

показателей, несмотря на огромные затраты по разработке и внедрению средств комплексной механизации очистных работ. Негативным фактором является высокий уровень потерь угля. Анализ списка ликвидируемых убыточных шахт показывает, что некоторые из них являются градообразующими и поставляют энергетические угли для местных нужд. В этих условиях перспективным представляется использование технологий, предусматривающих термическую переработку угля в месте его залегания [1, 2]. Данная технология активно развивается с 1980-х гг. [3]. Промышленное использование технологии показало ее эффективность и возможность применения в регионах с быстрорастущим спросом на энергию [4]. Накопленный опыт термической переработки угля в местах его залегания позволил выявить ряд характерных недостатков этой технологии и показал, что их устранение принципиальных трудностей не вызывает. Это позволяет утверждать об эффективном ее применении в большинстве угольных бассейнов РФ [5, 6, 7]. При этом в сферу промышленного производства может быть вовлечена часть оставшихся в целиках балансовых и забалансовых запасов. Пласты, опасные по геогазодинамическим явлениям, высокогазоносные пласты, пласты, горные работы на которых осложнены горно-геологическими условиями, не являются препятствием для организации безопасного производства. Анализ результатов выполненных промышленных и экспериментальных исследований показал необходимость поиска новых подходов к расчетам параметров подземных газогенераторов [8]. С целью оптимизации параметров процессов исследования ведутся по многим направлениям. Важное значение имеет шаг заложения скважин и расход дутья [9]. Оценивается влияние состава агентов, подаваемых в подземный генератор, например кислорода, на состояние вмещающих пород [10], использование CO_2 для этих целей [11] и т. д. Одним из важнейших этапов определения эффективности технологии термической переработки угля в месте его залегания является расчет показателей материального баланса.

Определение теоретически необходимого объема воздуха для полного сжигания 1 кг рабочей массы угля, т. е. при отсутствии потерь воздуха и продуктов сгорания в окружающую среду, проводится без учета того, находятся ли горючие элементы угля в каких-либо определенных соединениях или химическая формула этих соединений неизвестна. Принимают во внимание только содержание горючих элементов в рабочей массе угля и стехиометрические соотношения между расходом воздуха и горючих элементов при полном окислении последних.

При известном элементном составе сжигаемого угля расчет теоретического объема сухого воздуха, отнесенного к нормальным физическим условиям, $V_{\text{с.в.}}^0(P_0, T_0)$, нор. м³/кг угля, где $P_0 = 273,15$ К; $T_0 = 101325$ Па – абсолютные давление и температура, определяющие нормальные физические условия, осуществляется по известной нормативной формуле [4, 5, 6]:

$$V_{\text{с.в.}}^0(P_0, T_0) = 0,0889C^r + 0,265H^r + 0,0333(S_c^r - O^r), \quad (1)$$

где C^r, H^r, S_c^r, O^r – содержание углерода, водорода, горючей серы и кислорода в рабочей массе угля, массовая доля, %.

Переход к теоретическому объему реального атмосферного воздуха $V_{\text{в.}}^0(P_0, T_0)$ осуществляется следующим образом [7, 8]:

$$V_{\text{в.}}^0(P_0, T_0) = V_{\text{с.в.}}^0(P_0, T_0)(1 + 1,607d_{\text{м.в.}}) = V_{\text{с.в.}}^0(P_0, T_0)(1 + 1,243d_{\text{а.в.}}),$$

где $d_{\text{м.в.}}$ – размерное массовое влагосодержание воздуха, кг пара/кг сух. возд.; $d_{\text{а.в.}}$ – отнесенное к нормальным физическим условиям абсолютное влагосодержание воздуха, кг пара/нор. м³ сух. возд.

При нормативном влагосодержании воздуха, когда $d_{м.в} = 10$ г пара/кг сух. возд., а $d_{а.в} = 12,928$ г пара/нор. м³ сух. возд., $V_B^0(P_0, T_0) \approx 1,016 V_{с.в}^0(P_0, T_0)$.

Анализ отношений $V_B^0(P_0, T_0) / V_{с.в}^0(P_0, T_0)$ показывает, что при относительно невысоких температурах поступающего в зону горения (ЗГ) воздуха ($T_B \leq 300$ К), что имеет место при отсутствии его подогрева, $V_B^0(P_0, T_0)$ превышает $V_{с.в}^0(P_0, T_0)$ не более чем на 2–4 %. Поэтому в расчетах, не претендующих на высокую точность, при этих T_B можно принимать $V_B^0(P_0, T_0) = V_{с.в}^0(P_0, T_0)$.

Реальные условия сгорания угля в ЗГ довольно сильно отличаются от идеальных, поэтому реальный теоретический объем воздуха V_B , обеспечивающий сгорание 1 кг рабочей массы угля, отличается от V_B^0 и определяется как

$$V_B(P_0, T_0) = \alpha_B V_B^0(P_0, T_0),$$

где α_B – коэффициент избытка воздуха, при наличии в продуктах сгорания свободного кислорода $\alpha_B > 1,0$, $\alpha_B < 1,0$ при появлении в продуктах сгорания горючих газов. Определяется α_B только экспериментально на основании данных газового анализа продуктов сгорания на выходе из ЗГ.

Расчет $V_B^0(P_0, T_0)$ по приведенным ранее формулам несложен, однако требует знания элементного состава углей. В современной технической литературе имеются данные об элементном составе всех углей бывшего СССР. Однако эти данные усреднены в целом по месторождению и в основном характеризуют балансовые запасы углей. Технология подземного сжигания угля для получения тепловой энергии зачастую предназначена для отработки тех угольных запасов и месторождений, которые не относились изначально к балансовым. Элементный состав этих углей может довольно сильно отличаться от справочных данных. Определение элементного состава углей – задача довольно трудоемкая. Однако большой необходимости в этом нет.

Проведенный анализ литературных источников показал, что к настоящему времени в литературе предложено несколько методов приближенных расчетов $V_B^0(P_0, T_0)$ в основу которых положены низшая теплота сгорания рабочей массы углей Q_i^r и общая влага W_i^r рабочей массы углей.

Методы приближенных расчетов $V_{с.в}^0(P_0, T_0)$ основаны на правиле Вельтера–Бертье, которое линейно связывает физическую сторону процесса горения (расходы воздуха и продуктов сгорания) с химической (количество тепла, выделенного при сгорании).

Первым формулу для приближенного расчета $V_{с.в}^0(P_0, T_0)$ предложил Д. И. Менделеев [12], в системе СИ она записывается как

$$V_{с.в}^0(P_0, T_0) = 2,65 \cdot 10^{-4} Q_i^r, \quad (2)$$

где Q_i^r – низшая теплота сгорания рабочей массы угля, кДж/кг угля.

Аналогичная формула для углей была предложена учеником Д. И. Менделеева Д. П. Коноваловым [12]:

$$V_{с.в}^0(P_0, T_0) = 2,63 \cdot 10^{-4} Q_i^r. \quad (3)$$

В работе [13] для расчета $V_{с.в}^0(P_0, T_0)$ при сжигании углей предложена формула в виде:

$$V_{с.в}^0(P_0, T_0) = 2,4 \cdot 10^{-4} Q_i^r + 0,5. \quad (4)$$

Анализ этих формул показывает следующие их недостатки. В них не учитывается, что угли при $Q_i^r = \text{const}$ могут содержать разное количество связанного O_2 , а также не учтена величина W_i^r углей.

Эти факторы были учтены при разработке теплотехнических расчетов по приведенным характеристикам топлива. Работы в этом направлении были начаты С. Я. Корницким [14] и продолжены Я. Л. Пеккером [15]. Проведенные ими статистические исследования углей бывшего СССР позволили получить формулу для расчета $V_{c.в.}^0(P_0, T_0)$ в виде:

$$V_{c.в.}^0(P_0, T_0) = a(Q_i^r + 25,1W_i^r)/4186, \quad (5)$$

где a – обобщенный статистический коэффициент, усредненный по базовым группам углей; W_i^r – массовая доля общей влаги, %. При этом С. Я. Корницкий разбил все угли на четыре базовые группы, а Я. Л. Пеккер – на восемь. Значения коэффициентов a , по С. Я. Корницкому, приведены в табл. 1, а по Я. Л. Пеккеру – в табл. 2.

Таблица 1

Значения обобщенных статистических коэффициентов для расчетов $V_{c.в.}^0(P_0, T_0)$ и $V_{г.}^0(P_0, T_0)$, по С. Я. Корницкому

Угли	a	b
Бурые	1,085	1,166
Каменные пламенные	1,095	1,160
Каменные тощие	1,100	1,149
Антрациты	1,100	1,133

В группу пламенных углей включены угли с выходом летучих на сухое беззольное состояние $V^{daf} > 20\%$, а в группу тощих – с $V^{daf} \leq 20\%$ (массовая доля).

В справочном пособии [16] для расчета $V_{c.в.}^0(P_0, T_0)$ при сжигании углей предложены следующие эмпирические формулы:

для бурых и каменных углей с $Q_i^r \leq 21770$ кДж/кг

$$V_{c.в.}^0(P_0, T_0) = 2,6 \cdot 10^{-4} Q_i^r + 0,0066W_i^r - 0,03; \quad (6)$$

для бурых и каменных углей с $Q_i^r > 21770$ кДж/кг

$$V_{c.в.}^0(P_0, T_0) = 2,68 \cdot 10^{-4} Q_i^r + 0,0066W_i^r - 0,19; \quad (7)$$

для антрацитов

$$V_{c.в.}^0(P_0, T_0) = 2,62 \cdot 10^{-4} Q_i^r + 0,0066W_i^r - 0,01.$$

Оценка погрешностей ε_n рассмотренных приближенных формул (2)–(8) была сделана путем сравнения значений $V_{c.в.}^0(P_0, T_0)$, рассчитанных по нормативной формуле (1) и по приближенным формулам. Анализ полученных результатов показал следующее. При сгорании каменных углей и антрацитов все приближенные формулы дают приблизительно одинаковую погрешность. В среднем она не превышает 1%. Исключение составляет формула (4) для антрацитов. В них погреш-

ность формулы (4) увеличивается в несколько раз. В бурых углях, характеризующихся довольно большими величинами W_i^r наименьшую погрешность дают формулы (5)–(8). У них погрешность определения $V_{с.в}^0(P_0, T_0)$ не превышает 1,5 %, что в 2–4 раза меньше погрешности формул (2)–(4).

Таким образом, при расчетах $V_{с.в}^0(P_0, T_0)$ отпадает необходимость знать точный элементный состав углей. Вполне достаточно знать вид сжигаемого угля и два показателя – Q_i^r и W_i^r . Определение Q_i^r углей в настоящее время не составляет большой трудности, так как разработан метод довольно точной оценки этой величины на базе трех основных показателей технического анализа углей: W_i^r , V^{daf} и зольности углей на сухое состояние A^d . Определение этих трех показателей осуществляется довольно легко.

Таблица 2

Значения обобщенных статистических коэффициентов для расчетов $V_{с.в}^0(P_0, T_0)$ и $V_{г}^0(P_0, T_0)$, по Я. Л. Пеккеру

Угли	a	b	Δ	$x, \%$
Донецкие антрациты	1,11	1,14	0,013	19,9
Донецкие полуантрациты	1,11	1,14	0,018	19,0
Донецкие тощие угли	1,11	1,16	0,036	18,5
Недонецкие тощие угли	1,10	1,16	0,038	18,7
Каменные угли	1,10	1,16	0,050	18,2
Бурые угли с $V^{daf} \leq 45 \%$ (массовая доля)	1,09	1,18	0,055	19,4
Бурые угли с $V^{daf} > 45 \%$ (массовая доля)	1,10	1,19	0,075	18,6
Бурые угли Канско-Ачинского бассейна ($V^{daf} \approx 48 \%$ (массовая доля))	1,08	1,17	0,070	19,4

В группу тощих углей включены каменные угли с $V^{daf} \leq 20 \%$ (массовая доля).

Теоретический объем продуктов полного сгорания 1 кг рабочей массы угля $V_{г}^0(P_0, T_0)$ имеет место при сгорании угля в теоретическом объеме воздуха $V_{в}^0(P_0, T_0)$ при отсутствии потерь воздуха и продуктов сгорания в окружающую среду:

$$V_{г}^0(P_0, T_0) = V_{с.г}^0(P_0, T_0) + V_{п.в}^0(P_0, T_0),$$

где $V_{с.г}^0(P_0, T_0)$, $V_{п.в}^0(P_0, T_0)$ – отнесенные к нормальным физическим условиям теоретические объемы сухих продуктов сгорания и паров воды, нор. м³/кг угля.

При известном элементном составе угля величина $V_{г}^0(P_0, T_0)$ применительно к процессу сжигания угля в подземных условиях определяется по известной нормативной формуле с дополнительным слагаемым, учитывающим увеличение объема продуктов сгорания за счет испарения воды внешнего водопритока:

$$V_{г}^0(P_0, T_0) = 0,0187(C^r + 0,375S_c^r) + 0,008N^r + 0,79V_{с.в}^0(P_0, T_0) + 0,111H^r + 0,01243W_i^r + 1,243d_{ав} V_{с.в}^0(P_0, T_0) + 1,243g_{вод} \quad (9)$$

где N^r , H^r – содержание азота и водорода в рабочей массе угля, массовая доля, %; $g_{вод}$ – величина удельного внешнего водопритока в ЗГ, т. е. масса воды, приходящаяся на 1 кг сгораемого угля, кг воды/кг угля.

Реальный теоретический объем продуктов полного сгорания $V_{\Gamma}^0(P_0, T_0)$ больше $V_{\Gamma}^0(P_0, T_0)$ на величину объема избыточно поступающего в зону горения сухого воздуха $\Delta V_{\text{с.в.}}^0(P_0, T_0) = (\alpha_{\text{в}} - 1)V_{\text{с.в.}}^0(P_0, T_0)$ и объема содержащихся в избыточном воздухе паров воды $\Delta V_{\text{с.в.}}^0(P_0, T_0) = 1,243d_{\text{а.в.}}(\alpha_{\text{в}} - 1)V_{\text{с.в.}}^0(P_0, T_0)$. Соответственно:

$$\begin{aligned} V_{\Gamma}(P_0, T_0) &= V_{\Gamma}^0(P_0, T_0) + \Delta V_{\text{с.в.}}(P_0, T_0) + \Delta V_{\text{п.в.}}(P_0, T_0) = \\ &= V_{\Gamma}^0(P_0, T_0) + (\alpha_{\text{в}} - 1)V_{\text{с.в.}}^0(P_0, T_0)(1 + 1,243d_{\text{а.в.}}). \end{aligned}$$

Расчет $V_{\text{с.в.}}^0(P_0, T_0)$ и $V_{\text{с.г.}}^0(P_0, T_0)$ с использованием формул (1) и (9), проведенный для абсолютного большинства углей бывшего СССР, показывает, что $V_{\text{с.в.}}^0(P_0, T_0) > V_{\text{с.г.}}^0(P_0, T_0)$. Разница между ними тем больше, чем выше содержание в угле так называемого свободного водорода (Н – 0,125О), т. е. Н₂ за вычетом эквивалентного по массе О₂. Однако разница между $V_{\text{с.в.}}^0(P_0, T_0)$ и $V_{\text{с.г.}}^0(P_0, T_0)$ не очень большая, не более 4 % по объему. В среднем можно принять $V_{\text{с.г.}}^0(P_0, T_0) \approx 0,98V_{\text{с.в.}}^0(P_0, T_0)$. Учитывая, что для воздуха с нормативным влажосодержанием $V_{\text{с.в.}}^0(P_0, T_0) \approx 0,98V_{\text{в.}}^0(P_0, T_0)$ получим взаимосвязь между $V_{\text{с.г.}}^0(P_0, T_0)$ и $V_{\text{в.}}^0(P_0, T_0)$ в следующем виде: $V_{\text{с.г.}}^0(P_0, T_0) \approx 0,96V_{\text{в.}}^0(P_0, T_0)$.

Разница между $V_{\Gamma}^0(P_0, T_0)$ и $V_{\text{с.г.}}^0(P_0, T_0)$ даже при $g_{\text{вод}} = 0$ изменяется в довольно широких пределах – от 4–6 % у антрацитов с $W_{\Gamma}^r = 4–7$ % до 20–30 % у бурых углей с $W_{\Gamma}^r = 20–50$ %. Также сильно влияет на величину $V_{\Gamma}^0(P_0, T_0)$ и внешний водоприток. Один килограмм поступающей в ЗГ воды увеличивает $V_{\Gamma}^0(P_0, T_0)$ на 10–40 %. Поэтому для уменьшения ошибки в расчетах $V_{\Gamma}^0(P_0, T_0)$ нужно обеспечить максимальную точность в определении $g_{\text{вод}}$.

Для приближенных расчетов $V_{\Gamma}^0(P_0, T_0)$ также предложено несколько формул, в основу которых положены те же принципы, что и для приближенных расчетов $V_{\text{с.в.}}^0(P_0, T_0)$.

В работе [16] для углей предложена формула:

$$V_{\Gamma}^0(P_0, T_0) = 2,1 \cdot 10^{-4} Q_{\Gamma}^r + 0,5. \quad (10)$$

В рассмотренных ранее работах [6, 10] для расчетов $V_{\Gamma}^0(P_0, T_0)$ предложена однотипная формула:

$$V_{\Gamma}^0(P_0, T_0) = b \frac{Q_{\Gamma}^r + 25,1W_{\Gamma}^r}{4186} + 0,01243W_{\Gamma}^r, \quad (11)$$

где b – обобщенный статистический коэффициент, усредненный по базовым группам углей, значения которого приведены в табл. 1 и 2.

В работе [17] предложено рассчитывать величину $V_{\Gamma}^0(P_0, T_0)$ с помощью показателя максимального теплосодержания 1 нор. м³ сухих продуктов сгорания, которая, по утверждению автора, является обобщенной константой для каждого вида углей. Использованный М. Б. Равичем показатель теплосодержания на самом деле есть изменение объемной энтальпии сухих продуктов сгорания угля в воздухе $\Delta i_{\text{с.г.}}$ в диапазоне температур от T_0 до конечной температуры продуктов сгорания T_{Γ} . Формула предложена в виде:

$$V_{\text{с.г.}}^0(P_0, T_0) = \frac{Q_{\Gamma}^r}{\Delta i_{\text{с.г.}}}. \quad (12)$$

Для бурых углей $\Delta i_{c.g} = 3705$ кДж/нор. м³, каменных – 3823 кДж/нор. м³, антрацитов – 3801 кДж/нор. м³.

Формулы (10) и (11) справедливы для воздуха с нормативным влажосодержанием $d_n^b = 0,012928$ кг пара/нор. м³ сух. возд. и $g_{вод} = 0$. Во всех приведенных ранее формулах Q_i^r измеряется в кДж/нор. м³.

Выполненная оценка точности формул (10)–(12) показала, что все они дают вполне приемлемую для практики точность в расчетах $V_{c.g}^0(P_0, T_0)$ и $V_r^0(P_0, T_0)$ – $\varepsilon_n = 1,20$ – $5,26$ %. Наименьшую погрешность, $\varepsilon_n = 1,34$ – $1,61$ % дает формула (11) с обобщенным коэффициентом Я. Л. Пеккера.

Формулы (10) и (11) можно легко преобразовать для приближенных расчетов $V_r^0(P_0, T_0)$ при подземном сжигании угля. Для этого в них надо добавить слагаемое $(\alpha_b - 1)[1,243(d_{a.b} - d_n^b)]V_{c.b}^0 + 1,243g_{вод}$.

Дальнейший статистический анализ, устанавливающий взаимосвязь между Q_i^r , W_t^r разных марок углей и компонентами продуктов полного их сгорания, позволил получить Я. Л. Пеккеру [15] также и приближенные формулы для расчетов

теоретического объема сухих трехатомных газов $V_{RO_2}^0 = V_{CO_2}^0 + V_{SO_2}^0$:

$$V_{RO_2}^0(P_0, T_0) = 0,01ax \frac{Q_i^r + 25,1W_t^r}{4186};$$

теоретического объема сухих продуктов сгорания:

$$V_{c.g}^0(P_0, T_0) = (0,79 + 0,01x)a \frac{Q_i^r + 25,1W_t^r}{4186}; \quad (13)$$

теоретического объема паров воды при $d_{a.b} = 0$ и $g_{вод} = 0$:

$$V_{п.в}^0(P_0, T_0) = [\Delta + 0,01a(21 - x)] \frac{Q_i^r + 25,1W_t^r}{4186} + 0,01243W_t^r, \quad (14)$$

где $V_{RO_2}^0(P_0, T_0)$, $V_{c.g}^0(P_0, T_0)$, $V_{п.в}^0(P_0, T_0)$ – нор. м³/кг угля; a , Δ , x – обобщенные статистические коэффициенты, приведенные в табл. 2.

Формула (14) учитывает объем паров воды, образованных путем сгорания водорода угля и испарения общей влаги. Учитывая дополнительное поступление паров воды в продукты сгорания с воздухом и за счет испарения воды подземного водопритока, получим формулу для приближенного расчета теоретических продуктов сгорания в подземных условиях в виде:

$$V_r^0(P_0, T_0) = [\Delta + a] \frac{Q_i^r + 25,1W_t^r}{4186} + 0,01243W_t^r + 1,243d_{a.b} V_{c.b}^0 + 1,243g_{вод}$$

Учитывая формулу (5), представим (15) в окончательном виде:

$$V_r^0(P_0, T_0) = [\Delta + a(1 + 1,243d_{a.b})] \frac{Q_i^r + 25,1W_t^r}{4186} + \quad (16)$$

$$+ 0,01243W_t^r + 1,243d_{a.b} V_{c.b}^0 + 1,243g_{вод}$$

Принимая во внимание уравнения (5) и (13), получим приближенную взаимосвязь между $V_{c.в}^0(P_0, T_0)$ и $V_{c.г}^0(P_0, T_0)$:

$$\frac{V_{c.в}^0(P_0, T_0)}{V_{c.г}^0(P_0, T_0)} = \frac{100}{79 + x}, \quad (17)$$

учитывая которую, получим выражение для приближенного расчета реального объема сухих продуктов сгорания $V_{c.в}^0(P_0, T_0)$ при $\alpha_B > 1,0$:

$$V_{c.г}(P_0, T_0) = (\alpha_B + 0,01x - 0,21)V_{c.в}^0(P_0, T_0).$$

Наличие довольно большого различия в величинах левой и правой частей взаимосвязи (17) является косвенным показателем наличия в уходящих из ЗГ газах продуктов неполного сгорания угля. Их содержание определяется при газовом анализе.

Анализ точности расчетов $V_{c.г}^0(P_0, T_0)$ по формуле (16), выполненный с использованием данных, полученных в ходе натуральных экспериментов [18, 19], показал, что средняя погрешность в расчетах имеет место при $g_{\text{вод}} = 0$ и составляет 1,5 %, а наибольшая не превышает 5 %. При увеличении $g_{\text{вод}}$ она резко снижается и при $g_{\text{вод}} \geq 2,0$ погрешность приближенной формулы (16) становится практически такой же, как и точной формулы (9). Таким образом, при отсутствии сведений по элементному составу сжигаемых углей расчет $V_{c.г}^0(P_0, T_0)$ принципиальных затруднений также не вызовет.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крейнин Е. В. Нетрадиционные термические технологии добычи трудноизвлекаемых топлив: уголь, углеводородное сырье. М.: ИРЦ Газпром, 2004. 302 с.
2. Ржевский В. В. Проблемы горной промышленности и комплекса горных наук. М.: Ладья, 1991. 244 с.
3. Vyas D. U. and Singh R. P. Worldwide developments in UCG and Indian initiative. Proc. Earth Planet Sci. 2015. Vol. 11. P. 29–37.
4. Greg Perkins, Ernest du Toit, Greg Cochrane, and Grant Bollaert Overview of underground coal gasification operations at Chinchilla, Australia. Energy sources, part A: Recovery, utilization, and environmental effects 2016. Vol. 38. No. 24. P. 3639–3646.
5. Прошунин Ю. Е., Потурилов А. М. О перспективах и направлениях развития технологии подземной газификации каменных и бурых углей // Кокс и химия. 2016. № 10. С. 11–22.
6. Белов А. В., Гребенюк И. В., Кинаев Н. Н., Бабаев А. Ю. Перспективы применения технологии подземной газификации в условиях угольных месторождений Дальнего Востока России // ГИАБ. 2015. № S7-31. С. 14–20.
7. Качурин Н. М., Богданов С. М., Воробьев С. А., Васильев П. В. Перспективы восстановления и комплексного развития Подмосковского буроугольного бассейна // Горный журнал. 2016. № 2. С. 30–35.
8. Загоршменный И. М., Кубрин С. С. Расчет диффузии кислорода к углеродной стенке с помощью дробной производной Летникова // Изв. вузов. Горный журнал. 2016. № 6. С. 105–115.
9. Ковалев Р. А., Болотов Г. С., Кононенко И. А., Савин В. И. Оценка параметров, влияющих на газификацию твердых топлив // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. Вып. 8. Ч. 2. С. 132–144.
10. Liu S., Qi C., Zhang S., Deng Y. Minerals in the ash and slag from oxygen-enriched underground coal gasification. Minerals, 2015. Vol. 11. 27 p.
11. Duan T. H., Lu C. P., Xiong S., Fu Z. Bin, and Chen Y. Z. Pyrolysis and gasification modelling of underground coal gasification and the optimization of CO₂ as a gasification agent. Fuel, 2016. Vol. 183. P. 557–567.
12. Равич М. Б. Топливо и эффективность его использования. М.: Наука, 1971. 358 с.
13. Расчеты нагревательных печей / под ред. Н. Ю. Тайца. Киев: Техника, 1979. 540 с.
14. Корницкий С. Я. Унификация паровых котлов. М.: Госэнергоиздат, 1947. 132 с.
15. Пеккер Я. Л. Теплотехнические расчеты по приведенным характеристикам топлива (обобщенные методы). М.: Энергия, 1977. 256 с.
16. Панин В. И. Справочное пособие теплоэнергетика жилищно-коммунального хозяйства. М.: Стройиздат, 1970. 415 с.

17. Равич М. Б. Упрощенная методика теплотехнических расчетов. Теплотехнические расчеты по обобщенным константам продуктов горения. М.: Наука, 1964. 366 с.

18. Селиванов Г. И., Загоршменный И. М., Янченко Г. А. Анализ извлечения энергии при подземном сжигании угольных охранных целиков газогенератора № 15 Южно-Абинской станции «Подземгаз» // Защита окружающей среды при разработке угольных месторождений: сб. статей. Караганда: Карагандинское обл. правление Союза научн. и инж. обществ СССР, 1991. С. 32–42.

19. Загоршменный И. М., Янченко Г. А. Определение области эффективного использования технологии термохимической переработки оставленных запасов угля с получением электрической энергии // Тез. докл. отчетной конф.-выставки по подпрограмме «Топливо и энергия» науч.-техн. программы «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники». М.: МЭИ, 2001. С. 132–133.

Поступила в редакцию 26 декабря 2017 года

PERFORMANCE CALCULATION OF THE MATERIAL BALANCE OF COMBUSTION PROCESS OF COAL IN UNDERGROUND CONDITIONS WITH A DEFICIT OF NECESSARY SOURCE DATA

Zakorshmennyi I. M., Kubrin S. S. – Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, the Russian Federation. E-mail: i_zakorshmennyi@mail.ru

Ianchenko G. A. – Mining Institute, National Research Technological University “MISIS”, Moscow, the Russian Federation. E-mail: yanchenkoga@kmail.ru

Mining to greater depths, into more difficult mining-geological conditions, leads to increased accident risks associated with downtime, damage or loss of mining process equipment, and injuries and victims of mining workers. In recent years, “Integrated program for the phased elimination of unprofitable mines, located in the territory of cities of Prokopyevsk, Kiselevsk, Anzhero-Sudzhensk, and relocation of residents of undermined areas” is carried out. The Program includes 12 mines; at that, some of them are town-forming. For the extraction of the remaining reserves it seems to be promising to use technologies involving thermal processing of coal in the place of its occurrence using the technology of underground gasification of coal. The economic efficiency of underground gas generator depends on many factors: geometric, technological, and engineering parameters, grade of coal, its physical and chemical properties that in varying degrees characterize the indicators of a material balance of coal combustion process in underground conditions. For a specific type of coal, approaches to calculation of indicators of material balance in coal combustion have been developed. However, reliable data about non-conforming stocks and stocks in the low layers are virtually absent. The article is devoted to the development of the scheme of calculating the material balance of coal combustion in underground conditions, when there is no required amount of input data. The analysis of existing approaches has been fulfilled; their strengths and weaknesses have been identified. The ratio between the volume of dry air, the volume of combustion products, and the amount of water vapor with the heat of coal combustion and with the account of grade composition has been obtained. Analysis of the accuracy of calculations of combustion products volume obtained by the formula based on the data of field experiments showed that the average error in the calculations is 1.5%, and the largest does not exceed 5%. The calculated scheme can be used in the calculation of indicators of material balance of the combustion process of coal in underground conditions for liquidated mines in accordance with “Integrated program”.

Key words: underground gas generator; underground coal combustion; material balance of coal combustion; air volume for combustion; elemental composition of the coal; combustion products volume; moisture content; combustion temperature; amount of water vapor.

REFERENCES

1. Kreinin E. V. *Netraditsionnye termicheskie tekhnologii dobychi trudnoizvlekaemykh topliv: ugol', uglevodorodnoe syr'e* [Unconventional thermal technologies of mining hard-to-recover reserves: coal and hydrocarbon crude]. Moscow, IRTs Gazprom Publ., 2004. 302 p.
2. Rzhenskii V. V. *Problemy gornoi promyshlennosti i kompleksa gornykh nauk* [Problems of the mining industry and the complex of mining sciences]. Moscow, Lad'ia Publ., 1991. 244 p.
3. Vyas D. U. and Singh R. P. Worldwide developments in UCG and Indian initiative. *Proc. Earth Planet Sci.*, 2015, vol. 11, pp. 29–37.
4. Greg Perkins, Ernest du Toit, Greg Cochrane, and Grant Bollaert Overview of underground coal gasification operations at Chinchilla, Australia. *Energy sources, part A: Recovery, utilization, and environmental effects* 2016, vol. 38, no. 24, pp. 3639–3646.
5. Proshunin Iu. E., Poturilov A. M. [Regarding the prospects and the directions of mineral coal and brown coal underground gasification technology]. *Koks i khimiia – Coke and Chemistry*, 2016, no. 10, pp. 11–22. (In Russ.)
6. Belov A. V., Grebeniuk I. V., Kinaev N. N., Babaev A. Iu. [Application problems of the technology of underground gasification in conditions of the coal deposits of the Russian Far East]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2015, no. S7-31, pp. 14–20. (In Russ.)
7. Kachurin N. M., Bogdanov S. M., Vorob'ev S. A., Vasil'ev P. V. [The prospects of reconstructing and integrated development of Podmoskovye basin of brown coal]. *Gornyi zhurnal – Mining Journal*, 2016, no. 2, pp. 30–35. (In Russ.)

8. Zakorshmennyy I. M., Kubrin S. S. [Calculation of oxygen diffusion to carbon wall with the help of Letnikov fractional derivative]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyy zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2016, no. 6, pp. 105–115. (In Russ.)
 9. Kovalev R. A., Bolotov G. S., Kononenko I. A., Savin V. I. [Estimating the parameters which influence the gasification of solid fuel]. *Izvestiia TulGU. Tekhnicheskie nauki – Proceedings of the TSU. Engineering Science*, 2015, issue 8, pt. 2, pp. 132–144. (In Russ.)
 10. Liu S., Qi C., Zhang S., Deng Y. Minerals in the ash and slag from oxygen-enriched underground coal gasification. *Minerals*, 2015, vol. 11. 27 p.
 11. Duan T. H., Lu C. P., Xiong S., Fu Z. Bin, and Chen Y. Z. Pyrolysis and gasification modelling of underground coal gasification and the optimization of CO₂ as a gasification agent. *Fuel*, 2016, vol. 183, pp. 557–567.
 12. Ravich M. B. *Toplivo i effektivnost' ego ispol'zovaniia* [Fuel and its application efficiency]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 358 p.
 13. *Raschety nagrevatel'nykh pechei / pod red. N. Iu. Taitsa* [Heating furnace calculation. Edited by N. Iu. Taita]. Kiev, Tekhnika Publ., 1979. 540 p.
 14. Kornitskii S. Ia. *Unifikatsiia parovykh kotlov* [Steam boilers unification]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1947. 132 p.
 15. Pekker Ia. L. *Teplotekhnicheskie raschety po privedennym kharakteristikam topliva (obobshchennye metody)* [Heat power engineering calculation over the given characteristics of fuel (generalized methods)]. Moscow, Energiia Publ., 1977. 256 p.
 16. Panin V. I. *Spravochnoe posobie teploenergetika zhilishchno-kommunal'nogo khoziaistva* [A reference book of municipal engineering heat power engineering]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1970. 415 p.
 17. Ravich M. B. *Uproshchennaia metodika teplotekhnicheskikh raschetov. Teplotekhnicheskie raschety po obobshchennym konstantam produktov goreniia* [Simple methods of heat power engineering calculations. Heat power engineering calculations over the generalized constants of combustion products]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 366 p.
 18. Selivanov G. I., Zakorshmennyy I. M., Ianchenko G. A. [Analysis of energy extraction at underground combustion of coal protective pillars of gas generator no. 15 of the South-Abinsk station “Podzemgaz”]. *Zashchita okruzhaiushchei sredy pri razrabotke ugol'nykh mestorozhdenii: sb. statei* [Collection of works “Environmental protection under the exploitation of coal deposits”]. Karaganda, Karagandinskoe obl. pravlenie Soiuzna nauchn. i inzh. obshchestv SSSR Publ., 1991, pp. 32–42. (In Russ.)
 19. Zakorshmennyy I. M., Ianchenko G. A. [Determination of the sphere of efficient application of the technology of thermochemical processing of abandoned coal reserves with the production of electric energy]. *Tez. dokl. otchetnoi konf.-vystavki po podprogramme «Toplivo i energiya» nauch.-tekhn. programmy «Nauchnye issledovaniia vysshei shkoly po prioritnym napravleniim nauki i tekhniki»* [Proc. of reporting conf.-exhibition on the subprogram “Fuel and Energy” of the scientific-engineering program “Scientific Investigations of a Higher School on the Priority Directions of Science and Technology”]. Moscow, MEI Publ., 200, pp. 132–133. (In Russ.)
-