

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ БЕЛАРУСИ НА ОСНОВЕ ИХ ГАЗИФИКАЦИИ В КИПАЮЩЕМ СЛОЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Докт. техн. наук, проф. БОКУН И. А.

Белорусский национальный технический университет

В связи с ростом цен на импортное топливо одним из приоритетных направлений развития республики является обеспечение энергетической безопасности за счет использования местных ресурсов. К местным топливам относятся: биомасса, бурые угли, запасы которых составляют порядка 150 млн т, и сланцы (11 млрд т).

Характерной особенностью практически всех видов горючих сланцев является значительное содержание в органическом веществе диспергированной минеральной массы. В сухом веществе горючих сланцев содержится 50–80 % неорганических соединений и 20–35 % керогена (углеводород, водород, сера). Минеральная же часть сланцев состоит из карбонатов Са, Mg, а также Fe, кремнистых и глинистых соединений. Высокая зольность горючих сланцев (до 70 %) и низкая теплотворная способность (до 6000 кДж/кг влажностью до 5 %) требуют выбора соответствующего метода их использования, тем более, что себестоимость добычи сланцев доходит до 6–7 дол./т. Эффективно использование горючих сланцев на электростанциях Эстонии и Германии [1, 2]. Результаты исследований, приведенных в [3], свидетельствуют о целесообразности вовлечения горючих сланцев Беларуси в структуру топливно-энергетического баланса республики.

Показано [2], что себестоимость электроэнергии на сланцевых прибалтийских тепловых электростанциях не превышает себестоимости электроэнергии угольных и даже мазутных электростанций. В структуре себестоимости электроэнергии станций на сланцах топливная составляющая равна 63–67 %, амортизация – 25–32 %, вода – 0,1–0,7 %, заработная плата – 1,6–1,2 % и прочие производственные расходы – 4,5–3,9 %. При пылевидном сжигании сланцев расход энергии на собственные нужды достигает 9–10 %, а также имеют место повышенный износ поверхностей нагрева и загрязнение окружающей среды [2].

Сегодня известны направления освоения сланцев. Первое – энергетическое (горючие сланцы используются в качестве топлива котлов электростанций). Второе направление – технологическое (они подвергаются термическому разложению, и в результате выделяются жидкие и газообразные продукты – смола, газовый бензин, газ, пирогенетическая вода). Кроме получения искусственного жидкого топлива и газа, технологическая переработка позволяет организовать производство ряда химических продуктов на базе фенолов, серы, получаемой при очистке газа, и др. Третье направление – энергоклинкерное (пылевидные горючие сланцы сжигаются в топках котлов с расплавом золы, из которой получают клинкер – высокопрочный сланцевый цемент). Это направление опробовано в Эстонии и ФРГ на ус-

тановке с кипящим слоем [2]. На четвертом направлении используется наиболее прогрессивная техника энергетического и технологического потребления горючих сланцев. В этом случае в специальных агрегатах последние первоначально подвергаются высокоскоростной термической переработке, а затем полученное газомазутное топливо сжигается в топках котлов. Развитие энерготехнологического направления – энергохимическое применение горючих сланцев с целью получения химических продуктов, строительных материалов, электроэнергии. При использовании горючих сланцев в теплоэнергетике необходимо учитывать экономические и экологические факторы. Этому могут соответствовать технологии, основанные на применении парогазовых установок с внутрицикловой газификацией горючих сланцев в кипящем и пульсирующем слое под давлением.

Применение высоких давлений при газификации топлива позволяет увеличить концентрацию реагирующего газа в реакционном объеме, уменьшить скорость газового потока при одном и том же массовом расходе, увеличить время контакта газов с перерабатываемым топливом. С повышением давления в аппарате с кипящим слоем от p_0 до p линейная скорость газового потока W_j^p , необходимая для организации кипящего слоя, с той же степенью расширения будет уменьшаться обратно пропорционально корню квадратному из отношения давлений [2]

$$W_j^p = W_j^{p_0} \sqrt{\frac{p}{p_0}}, \quad (1)$$

где $W_j^{p_0}$ – скорость газового потока, соответствующая устойчивому состоянию кипящего слоя в расчете на крупные частицы, не уносимые из аппарата при давлении, близком к атмосферному.

С повышением давления в аппарате средний диаметр мелких частиц, уносимых из аппарата, должен уменьшаться обратно пропорционально корню четвертой степени из отношения давлений [3]

$$d_p = \frac{d_0}{\sqrt[4]{\frac{p}{p_0}}}, \quad (2)$$

где d_0 – предельный диаметр мелкой частицы, уносимой из верхней зоны кипящего слоя.

Повышение давления в газогенераторе с кипящим слоем увеличивает интенсивность процесса газификации пропорционально корню квадратному из отношения давления [4]

$$q_T^p = q_T^{p_0} \sqrt{\frac{p}{p_0}}, \quad (3)$$

где q_T^p – интенсивность процесса газификации при повышенном давлении, кг/(м²·ч); $q_T^{p_0}$ – то же при давлении, близком к атмосферному, кг/(м²·ч).

Кроме того, при газификации одного и того же вида топлива в зависимости от способа его проведения, состава применяемого дутья, параметров

технологического режима, а также конструкции газогенератора можно получить газ различной теплотворной способности. Так, при парокислородной газификации топлива под давлением получаемый газ содержит повышенное количество метана [4]. С ростом давления увеличивается количество связанного водорода в газе и превышает количество водорода, первоначально содержащегося в топливе, образующегося за счет разложения водяного пара. Оптимальный состав дутья с учетом температурного режима, предотвращения шлакования подбирается опытным путем. Так, оптимальный состав дутья при газификации бурого угля составлял

$$\frac{\text{H}_2\text{O}}{\text{Воздух}(\text{O}_2)} = 0,16-0,18 \text{ кг/м}^3 \text{ (норм.)}$$

при паровоздушном дутье и 4,3–4,5 кг/м³(норм.) – при парокислородном дутье. После отмывки газа от CO₂ температура сгорания может составлять до 15500–16000 кДж/кг [5]. Для повышения теплоты сгорания продуктов газификации горючих сланцев можно осуществить совместную газификацию сланцев и отходов крекинга нефти.

Основным фактором, который определяет результаты термического разложения топлива, является температура. С ее увеличением возрастает выход горючего газа. В этом случае одновременно с уменьшением выхода полуккокса снижается выход смолы и пирогенетической воды. При постоянной температуре повышение давления в газогенераторе увеличивает время пребывания газов в аппаратуре, что способствует интенсификации вторичных реакций в парогазовой фазе и увеличивает коэффициент перехода теплоты топлива в газ.

Процесс термического разложения сланцев зависит как от скорости собственно химического превращения, так и от условий тепло- и массообмена между газом и зернистой средой (топливом).

В результате увеличения давления в газогенераторе с кипящим слоем удается сократить время прогрева частицы до температуры реакции и сократить скорость реакции [6]

$$\frac{1}{\tau_p} \approx p^m e^{-E/RT}, \quad (4)$$

где τ_p – время реакции; p – давление; T – температура.

С ростом давления в кипящем слое для реакций с неизменным порядком выше нуля, протекающих в области кинетического режима, скорость реагирования дополнительно увеличивается за счет повышения массовой концентрации реагентов.

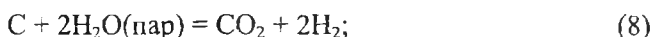
При газификации под давлением около 85 % водорода, получаемого в результате разложения водяного пара, переходит в газ в виде свободного водорода и только 15 % водорода взаимодействует с продуктами термического разложения и газификации топлива, в то время как при газификации при нормальном давлении в свободный водород газа переходит не только весь водород разложившегося водяного пара, но и водород органической массы топлива.

Теплота сгорания от термического разложения топлива зависит от выхода летучих продуктов и содержания в горючей массе кислорода и может определяться по формуле Г. Ф. Кнорре

$$Q_{\text{лет}} = \frac{3500}{C_0^{0,42}}, \quad (5)$$

где $Q_{\text{лет}}$ – теплота сгорания летучих продуктов, кДж/кг; C_0 – содержание углерода в горючей массе углерода, кг/кг.

В процессе газификации горючих сланцев протекают реакции:



Для анализа этих реакций могут быть использованы законы химической термодинамики и кинетики.

Из прибалтийского сланца при газификации в кипящем слое на паровоздушном дутье получают отопительный газ с теплотворностью 4000 кДж/м³(норм.) при КПД газификации 52 % и тепловом КПД с учетом избыточного пара, который может быть получен в котле-утилизаторе, за вычетом пара, расходуемого на собственные нужды, – 70 % [7].

Так как горючие сланцы содержат серу, с целью предотвращения загрязнения окружающей среды продукты газификации должны быть очищены от сернистых соединений. Исследования [8] показали, что капитальные затраты в ПГУ с внутрицикловой газификацией сланца можно представить в виде [7]

$$\Delta K = \Delta K_{\text{агр}} + \Delta K_{\text{кл}} + \Delta K_{\text{тп}} + \Delta K_{\text{бхс}} + \Delta K_{\text{хс}} + \Delta K_{\text{вру}}, \quad (10)$$

где $\Delta K_{\text{агр}}$ – капитальные затраты на технологическое оборудование по тракту генераторного газа (от газогенератора до ПГУ); $\Delta K_{\text{кл}}$ – то же на установку производства серы методом Клауса; $\Delta K_{\text{бхс}}$ – то же в систему очистки сточных вод; $\Delta K_{\text{хс}}$ – то же в систему производства хлора; $\Delta K_{\text{вру}}$ – то же на воздухоразделительные установки.

Определение капитальных затрат на газогенераторное оборудование и технологические аппараты системы очистки генераторного газа с учетом давления и характеристик парогазовой смеси можно осуществить, учитывая металлоемкость агрегатов, зависящую от толщины стенки (в соответствии с требованиями к технологической прочности основных узлов). В таком случае капитальные затраты составят

$$\Delta K_{\text{агр}} = K_n M_{\text{агр}} \Pi_{\text{мет}}, \quad (11)$$

где $M_{\text{агр}}$ – масса агрегата; $\Pi_{\text{мет}}$ – удельная стоимость применяемого металла, у. е./т; K_n – поправочный коэффициент, учитывающий затраты на изготовление и неучтенное оборудование.

Режим дутья оказывает сильное влияние на выход побочных продуктов, удельные стоимости которых зависят от реализации побочных продуктов газификации сланцев

$$Z_{\text{поб пр}} = \sum V_i C_i, \quad (12)$$

где V_i – выход i -го продукта (зола, смола, сера); C_i – удельная стоимость i -го продукта.

Нужно отметить, что с повышением давления в газогенераторе в реакционном объеме увеличивается плотность парогазовой смеси, что ведет к снижению габаритов газогенератора и снижению капитальных вложений [4, 7]. Отмечается [7], что удельные капитальные вложения на ПГУ составляют 800 у. е./кВт. Повышение давления в газогенераторе позволит снизить расход электроэнергии на собственные нужды.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены технологии энергетического использования сланцев.
2. Показана эффективность строительства ПГУ с внутрицикловой газификацией горючих сланцев в кипящем слое под давлением, а также необходимость исследований, связанных с энергетическим использованием сланцев в Республике Беларусь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эпик, И. П. Проблемы энергетического использования горючих сланцев / И. П. Эпик // Энергетика. (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1977. – № 4 – С. 54–62.
2. Кузнецов, Д. Т. Энергохимическое использование горючих сланцев / Д. Т. Кузнецов. – М.: Энергия, 1978. – С. 217.
3. Шпорта, И. П. Проблемы развития и повышения эффективности использования топливно-энергетического комплекса Белорусской ССР / И. П. Шпорта, В. И. Трутаев. – Мн., 1979.
4. Альтшулер, В. С. Новые процессы газификации твердого топлива / В. С. Альтшулер. – М.: Недра, 1976. – С. 280.
5. Альтшулер, В. С. Процессы в кипящем слое под давлением / В. С. Альтшулер, Г. П. Сеченов. – М., 1963. – С. 214.
6. Франк-Каменецкий, Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д. А. Франк-Каменецкий. – М.: Наука, 1967. – С. 491.
7. Письмен, М. К. Газификация прибалтийского сланца в кипящем слое / М. К. Письмен, В. Г. Ермаков, Ю. И. Белянин // Газовая промышленность. – 1957. – № 3. – С. 5–8.
8. Янов, А. В. Оптимизация состава оборудования и рабочих параметров газификации сернистых сланцев Поволжья для использования с ПГУ: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. В. Янов. – Саратов: ГТУ, 2005. – С. 20.

Представлена кафедрой
экономики и организации
энергетики

Поступила 14.02.2006