

В. В. Дударев доцент, канд. техн. наук; А. Б. Сухоцкий, канд. техн. наук;  
А. А. Сакович доцент, канд. техн. наук

## ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕЛОРУССКИХ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

The basic directions of use and ways of processing of combustible shale are considered in the paper. Technologies of energy-chemical application of Belarusian combustible shale with utilization shale ashes for manufacture of constructional materials are considered. The potentialities of commercial development of combustible shale deposits are demonstrated. There are economic grounds of using heat from shale and shale ashes combustion in the production of construction materials.

**Введение.** Рост стоимости и истощение ресурсов традиционных видов топлива, заставляет изыскивать новые альтернативные источники энергии. Наряду с использованием таких возобновляемых источников энергии, как солнечная, ветровая, гидроэнергия, для нашей страны может быть актуальна переработка торфа, бурых углей и горючих сланцев. При этом запасы и потенциал белорусских сланцев намного более значителен, чем других органических ископаемых топлив, имеющих на территории Республики Беларусь.

Горючие сланцы представляют собой осадочные минеральные образования, пропитанные органическими веществами, содержащими клетчатку, воск, жирные кислоты и т. д. и, в отличие от углей, характеризуются:

- наличием значительного (до 70 %) минерального балласта, в составе которого содержится до 50 % кальциевых соединений, в том числе много карбонатов;
- повышенным содержанием серы;
- низкой теплотой сгорания рабочей массы 4–9 МДж/кг;
- высоким (до 80 %) выходом летучих.

Возможность получения с применением определенных технологий из органической части горючих сланцев жидких и газообразных углеводородов, при условии утилизации зольного остатка, заставляет по новому взглянуть на этот незаслуженно забытый источник энергии.

**Условия залегания и характеристики сланцев Республики Беларусь.** В Республике Беларусь имеются запасы горючих сланцев, которые составляют 11 млрд. т [1, 2]. Общий потенциал их составляет 2420 млн. т у. т., технологически возможный на данный момент 792 млн. т у. т. (что может обеспечить примерно 17 лет потребности республики в энергии). Наиболее пригодные для эксплуатации два месторождения в пределах Припятского сланцевого бассейна – Любанское (200 млн. т у. т.) и Туровское (520 млн. т у. т.).

Мощность слоев Любанского месторождения – около 1,1 м, глубина залегания – от 221 до 473 м. Мощность слоев Туровского месторождения составляет около 1,2 м, глубина залегания – от 66 до 507 м. Эксплуатация Туровско-

го месторождения может осуществляться шахтным способом с годовой производительностью отдельной шахты 4,5 млн. т (0,4 млн. т у. т.) и сроком службы 45 лет.

Состав рабочей массы белорусских сланцев: углерод  $C^p = 9,5-18,8\%$ , водород  $H^p = 1,1-3,6\%$ , азот  $N^p = 0,12-0,19\%$ , кислород  $O^p = 0,8-16,0\%$ , сера  $S^p = 1,5-7,0\%$ . Содержание золы  $A^p = 61,4-82,3\%$ , содержание влаги  $W^p = 5,8-10,6\%$ , выход летучих  $V^p = 80-90\%$ . Теплота сгорания 4,2–9,6 МДж/кг.

**Основные направления использования и способы переработки горючих сланцев.** Основными направлениями использования горючих сланцев являются:

1) энергетическое – использование сланцев в качестве твердого топлива;

2) энерготехнологическое – горючие сланцы подвергаются термическому разложению, в результате чего выделяются жидкие и газообразные горючие продукты: смола, газовый бензин, газ и др.;

3) энергоклинкерное – пылевидные горючие сланцы сжигаются в топках котельных агрегатов с расплавом золы для получения клинкера высокомарочного сланцевого цемента;

4) энергохимическое – объединяющее все предыдущие направления и представляющее собой наиболее прогрессивное комплексное использование горючих сланцев с целью получения широкой гаммы продукции: энергии, химических продуктов и строительных материалов.

В теплоэнергетике при выборе способа утилизации горючих сланцев необходимо учитывать экономические и экологические факторы.

Использование сланцев в качестве топлива в электроэнергетике разных стран до сих пор не находило применения, за исключением Эстонии и России [1, 3]. Длительное время в России на Сызранской ТЭС работало пять котлов БКЗ-75 (производительность 75 т/ч, параметры пара 450 °С и 3,25 МПа) на сланце Кашпирского месторождения (теплота сгорания  $\approx 5,5$  МДж/кг) с подсветкой мазутом. Кроме того, российскими специалистами были созданы электростанции на среднекалорийных (теплота сгорания 8–9 МДж/кг) сланцах При-

балтики (Эстонская и Прибалтийская ГРЭС, ТЭЦ Ахтме, ТЭЦ Кохтла-Ярве). Проектная электрическая мощность энергоблоков с двухкорпусными котлами на самых мощных электростанциях – Прибалтийской и Эстонской ГРЭС – составляет 200 МВт, параметры пара – 13,8/2,2 МПа и 540/540 °С. Проектный расход топлива на отпущенную электроэнергию на этих энергоблоках равен 409 г у. т/(кВт · ч), что соответствует КПД ТЭС всего 30 %; практически эти показатели еще хуже.

Столь незначительное использование горючих сланцев в качестве топлива для электростанций объясняется низкой эффективностью энергоустановок и значительными эксплуатационными трудностями. По своим качествам сланцы не являются эффективным топливом из-за высокой зольности и низкой теплоты сгорания.

Сланцевая зола делится на летучую – улавливаемую при газоочистке фильтрами (≈64 %) и крупную – выпадающую на дно топки (≈36 %). Высокое содержание сравнительно низкоплавкой золы (1030–1170 °С) сопряжено с опасностью шлакования, с засорением и износом поверхностей нагрева, с повышением потерь от механического недожога, а так же с трудностями организации золоулавливания и золоудаления. Кроме того, летучая зола горючего сланца сильно засоряет воздушный бассейн. Вместе с дымовыми газами выбрасывается значительная масса золы и окислов серы.

Естественно, сжигание низкоэффективного белорусского сланца в топках котельных агрегатов чрезвычайно затруднительно, и выработка энергии на них окажется довольно дорогой.

Развивающаяся в последние 20 лет технология сжигания топлива в «кипящем» слое (классическом или циркулирующем) при атмосферном давлении принципиально позволяет использовать горючие сланцы любой калорийности с удовлетворительными экологическими показателями. Однако такая технология ограничивает единичную мощность котла и недостаточно эффективна.

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

$$d_T^p = d_T^{p_0} \sqrt{p/p_0},$$

где  $d_T^p$  – интенсивность процесса газификации при повышенном давлении, кг/(м<sup>2</sup> · ч);  $d_T^{p_0}$  – то же при давлении, близком к атмосферному, кг/(м<sup>2</sup> · ч).

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. При этом увеличивается плотность парогазовой смеси, что ведет к снижению габаритов газогенератора и снижению капитальных вложений [4].

Поскольку горючие сланцы содержат серу, с целью предотвращения загрязнения окружающей среды продукты газификации должны быть очищены от сернистых соединений.

**Технологическая переработка сланцев.** Способность горючих сланцев при термическом нагреве выделять летучие вещества, представляющие смесь сложных кислородных соединений и углеводородов, обусловила использование этого полезного ископаемого для технологической переработки с целью получения ряда ценных продуктов:

1) горючих – автобензина, моторного керосина, дизельного топлива, топочного мазута, высококалорийного газа, топочного масла;

2) химических – шпалопропиточного масла, двухатомных фенолов, клеевых смол (фенолформальдегидных, эпоксидных, феноло-спитовых), электродного кокса, кукуерсоль-лака, моющего средства «Типол» и др.

Из газового бензина также можно получать бензол, толуол, растворители.

В 1970–1990 гг. энергетическим научно-исследовательским институтом им. Кржижановского (ЭНИИ) была создана и освоена в промышленном масштабе пиролитическая технология переработки горючих сланцев, позволившая рассматривать сланцы с  $Q_n \geq 3,8$  МДж/кг как вполне приемлемый источник топлива для тепловых электростанций, причем КПД таких станций может превышать КПД ТЭС, работающих на качественных углях при тех же параметрах пара [3]. Технология реализуется при близком к атмосферному давлении (максимальное избыточное давление в аппаратах 0,025–0,03 МПа).

Суть технологии состоит в том, что сырой сланец предварительно проходит грохочение и дробление в дробилке, после чего подается в сушилку для сушки горячим паром из котла-утилизатора (рисунок).

Раздробленный до определенного размера и высушенный сланец смешивается с высокотемпературным (800–850 °С) теплоносителем, которым является собственная зола сланца, и подается во вращающийся реактор пиролиза. Здесь сланец нагревается при отсутствии кислорода до температуры 460–490 °С, и из него выделяется парогазовая смесь, содержащая пары углеводородов, неконденсирующиеся газы (Н<sub>2</sub>, СО, N<sub>2</sub>, Н<sub>2</sub>S, СН<sub>4</sub> и др.) и коксозольный остаток.

Парогазовые продукты термического разложения горючего сланца проходят через очи-



стку от пыли в пылевой камере и отводятся в конденсационное устройство, где пары углеводов конденсируются, образуя сланцевую смолу.

Дизельная фракция сланцевой смолы пригодна для использования в качестве газотурбинного топлива, а остальная ее часть – в качестве котельного топлива. Неконденсирующийся полукоксовый газ пригоден в качестве газотурбинного либо котельного топлива.



Рисунок. Технологическая схема установки термического разложения сланца

Коксовый остаток отводится из реактора пиролиза в аэрофонтанную топку, где его органические составляющие дожигаются в потоке воздуха. Выделившееся при этом тепло используется для нагрева золы-теплоносителя и для производства пара в котле-утилизаторе. Пар расходуется на собственные технологические и другие нужды. Важным этапом переработки сланцев является утилизация тепла отбираемой из топки золы, позволяющая повысить КПД процесса на 8–10 %.

Энергетическим институтом им. Г. М. Крижановского были проведены исследования технологической переработки белорусских сланцев. Получен следующий массовый выход продуктов термического разложения (температура в реакторе 480 °C), %: смола – 7,4 (теплота сгорания 41,5 МДж/кг), газовый бензин – 0,2 (44,6 МДж/кг), полукоксовый газ 3,3 (35,3 МДж/кг), вода пирогенетическая – 2,8, полукокк – 86,3.

Важными показателями этой технологии являются доли потенциального тепла топлива:  $q_{\text{пгс}}$  – переходящая в парогазовую смесь и  $q_{\text{кзо}}$  – остающаяся в коксозольном остатке. Чем больше  $q_{\text{пгс}}$ , тем больше высококалорийного

топлива (смола + газ) можно получить из сланца:  $q_{\text{пгс}} = 100 \% - q_{\text{кзо}}$ . Например, для белорусских сланцев  $q_{\text{пгс}} = 70 \%$ , т. е. в парогазовую смесь переходит почти 70 % потенциального тепла сланцев при наиболее благоприятной температуре пиролиза  $t = 460\text{--}480 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Использование в котлоагрегатах котельного масла и газа вместо горючего сланца значительно уменьшает загрязнение воздушного бассейна по двум причинам.

1. При термическом разложении горючего сланца в атмосферу выбрасывается в 5–6 раз меньше газов, чем при сжигании натурального сланца.

2. В дымовых газах технологической топки сернистый газ практически отсутствует. Объясняется это активным соединением окислов серы с известью при температуре 800 °C. Таким образом, до 90 % серы концентрируется в золе, а менее 10 % – в смоле и газе.

**Использование сланцевой золы в производстве строительных материалов.** Положительным эффектом сжигания сланцев может стать утилизация зольного остатка. Химический состав золы белорусских горючих сланцев, %:  $\text{SiO}_2 = 20\text{--}53,2$ ,  $\text{CaO} = 7,5\text{--}45,0$ ,  $\text{TiO}_2 = 0,30\text{--}0,93$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 6,1\text{--}17,6$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4,1\text{--}11,7$ ,  $\text{MgO} = 1,7\text{--}7,2$ ,  $\text{K}_2\text{O} = 1,1\text{--}6,3$ ,  $\text{Na}_2\text{O} = 0,15\text{--}0,63$  [2]. Такой состав позволяет использовать золу в производстве строительных материалов. Из крупных фракций летучей золы возможно изготовление ячеистых бетонов и силикатных изделий. Из мелкой фракции летучей золы целесообразно изготавливать вяжущие материалы: кукермитцемент, портландцемент. При этом экономичность энергетического использования горючих сланцев при применении соответствующей технологии их переработки значительно повышается.

Теоретические предпосылки и практический опыт применения пылевидных сланцевых зол [2, 5], позволяют выявить следующие пути рационального их использования в строительной практике:

- изготовление строительных автоклавных материалов;
- производство высокомарочного сланцевозольного портландцемента;
- производство низкомарочных вяжущих материалов с добавкой портландцементного клинкера и без него;
- укрепление оснований под дороги.

Каждое из этих направлений определяется физико-механическими свойствами сланцевых зол, улавливаемых в различных золоулавливающих устройствах (циклоны, электрофилтры и т. д.).

Использование сланцевой золы для производства автоклавного ячеистого бетона позволяет практически полностью заменить



портландцемент и воздушную известь, которые являются наиболее энергоемкими компонентами в составе сырьевой смеси [6]. По сравнению с типовой технологией производства ячеисто-бетонных изделий экономический эффект от производства сланцеугольных газобетонных изделий (плотностью 600–700 кг/м<sup>3</sup>) образуется за счет применения более дешевого сырья. Согласно данным П. Эвинга и Н. Хольта [5], в результате использования сланцевой золы на каждом кубометре газобетона экономится 80–120 кг цемента и до 110 кг извести. Высвобождение традиционных высокообжиговых вяжущих материалов типа извести и портландцемента для других более необходимых целей позволит получить на производстве автоклавных материалов годовую экономию в РБ до 100 тыс. т цемента и до 120 тыс. т извести.

В производстве высокомарочного портландцемента наиболее целесообразно использовать мелкозернистые золы, обогащенные CaSO<sub>4</sub>. В этом случае используется эффект гидратации CaSO<sub>4</sub> с образованием гипса CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O, что приводит к ускорению схватывания и твердения.

Сланцевольный портландцемент получается совместным помолом клинкера и сланцевой золы. В результате можно получать сланцевольный цемент марок 400, 500, 600, а бетоны, изготовленные на нем, могут применяться в наземных, подземных и даже подводных сооружениях на равных условиях с обычным портландцементом высоких марок.

Низкомарочные вяжущие материалы (кукермит-цемент) марок 75 и 100, обладающие рядом недостатков (по сравнению с портландцементом) представляют собой мелкую фракцию молотой золы. Однако его качественные показатели значительно улучшаются добавкой портландцементного клинкера. При совместном помолу 65–75 % золы и 25–30 % клинкера возможно получение вяжущего материала марки 300.

В Беларуси имеется три цементных завода: Белорусский цементный завод (г. Костюковичи, Могилевская обл.), ОАО «Красносельскстройматериалы» (гор. пос. Красносельский, Гродненская область), ПРУП «Кричевцементношифер» (г. Кричев, Могилевская область). Химический состав портландцемента с минеральными добавками ПЦ500-Д20 ПРУП «Кричевцементношифер», %: SiO<sub>2</sub> = 20,65–22,50, CaO = 56,45–62,95, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 5,54–6,10, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 4,10–4,92, MgO = 0,82–1,64, K<sub>2</sub>O = 0,65–0,73, Na<sub>2</sub>O = 0,20–0,32, SO<sub>3</sub> = 1,5–3,5. Основными сырьевыми компонентами цемента являются мел (CaO), глина (SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и пиритные огарки (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Как видно из сравнения химических составов портландцемента и сланцевой золы (см. ранее), последняя содержит необходимое для производства це-

мента количество SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Следовательно, сланцевая зола может полностью или частично заменить глину и пиритные огарки при производстве портландцемента, а также использоваться в качестве корректирующих добавок. Как показывают научные исследования и практический опыт, в состав цемента может добавляться до 30 % сланцевой золы.

При общей производительности белорусских цементных заводов около 3 млн. т цемента в год, они могут потреблять около 1 млн. т сланцевой золы, что соответствует утилизации 1,2 млн. т сланцев или 0,246 млн. т у. т. в год (это сопоставимо с энергией, которую планируют получать в РБ к 2010 г. в областях солнечной и ветроэнергетике).

В действительности потенциал цементных заводов по утилизации сланцев в несколько раз выше, поскольку около каждого цементного завода имеется множество использованных открытых сырьевых карьеров, где можно без больших экономических затрат и без дополнительного вреда для окружающей среды захоронить избыточную сланцевую золу.

Приблизительная оценка стоимости энергии при утилизации горючих сланцев на цементном производстве сводится к следующему расчету. Средняя теплота сгорания сланцев Любоньского месторождения 6 МДж/кг. Стоимость добычи шахтным способом около 6 у. е./т. Перевозка сланцев по железной дороге от Любани до Кричева около 4 у. е./т. Тогда, стоимость одной тонны сланцев составит 10 у. е. После пиролитической переработки тонны сланцев в установке с КПД 92 % и долей потенциального тепла топлива переходящей в парогазовую смесь  $q_{\text{прс}} = 70$  % будет получено 860 кг сланцевой золы, а также полукоксового газа и смолы с теплотой сгорания  $6 \cdot 0,7 \cdot 0,92 = 3860$  МДж или 132 кг у. т. по цене 10 у. е. Это соответствует 76 у. е. за т у. т. или 92 у. е. за 1 тыс. м<sup>3</sup> природного газа. Следует отметить, что мировая цена на природный газ в 2–2,5 раза больше.

Расчетное количество сланцевой золы (860 кг) достаточно для производства 2,6 т цемента. При этом полученная сланцевая парогазовая смесь позволит обеспечить 20 % потребности в технологическом тепле (из расчета 220 кг у. т. на тонну цемента).

Пылевидная сланцевая зола может применяться в качестве вяжущего материала для укрепления грунтов и покрытий. При смешивании грунта основания с золой в соотношении 5 : 1 по массе при толщине слоя 10–20 см, после смачивания и укладки зологрунтовая смесь затвердевает, и после поверхностной обработки битумными материалами образуется устойчивая и непылящая дорога (расход золы составляет в среднем 450 т/км).

**Целесообразность промышленного освоения горючих сланцев в РБ.** Несмотря на все положительные стороны комплексного безотходного способа переработки горючие сланцы не смогут заменить традиционные виды топлива (нефть и природный газ). Это связано, прежде всего, с ограниченной способностью промышленного и сельскохозяйственного комплекса республики по полной утилизации сланцевой золы.

В результате термической обработки горючих сланцев образуются продукты, которые могут быть использованы в энергетике, химической промышленности, производстве строительных материалов, дорожном строительстве и сельском хозяйстве. Эффективность использования их в первую очередь определяется уровнем потребности и затратами на производство.

Объем производства таких продуктов, как бензол, толуол, сольвент, а также фенолов, кетонов и кислот путем пиролиза газового бензина будет незначителен и не внесет большой вклад в повышение рентабельности предприятия.

Сложность промышленного использования горючих сланцев во многом связана с решением экологической проблемы – утилизации зольных отходов, остающихся в больших количествах (более 70 % сырья) в результате переработки сланцев. Однако при намеченной большой строительной программе в РБ имеются значительные и возникнут еще большие потребности в вяжущих материалах. Использование сланцевой золы может осуществляться с целью производства материалов как для дорожного, так и промышленного строительства. При этом утилизация сланцевой золы в цементном производстве может осуществляться в крупных масштабах.

Ввиду того, что сланцевые золы содержат значительное количество свободного CaO, а также некоторое количество полезных для растений калия и микроэлементов, их с успехом можно использовать для известкования кислых почв. В настоящее время в республике насчитывается 700 тыс. га торфяных почв, улучшение плодородия которых может обеспечено внесением в них более 1 млрд. т сланцевой золы.

При этом возможно совместная разработка калийных солей и горючих сланцев Солигор-

ским горнодобывающим предприятием, что позволит снизить себестоимость их добычи и удельные капиталовложения.

Возможность использования горючих сланцев рассматривалась в СССР еще в середине XX в. Однако на тот период их использование было не эффективно из-за доступности более энергоемких ресурсов. В настоящее время при росте себестоимости традиционных видов топлива и новом уровне современных технологий комплексное промышленное освоение горючих сланцев может стать экономически оправданным.

### Литература

1. Кузнецов, Д. Т. Энергохимическое использование горючих сланцев: Технико-экономические аспекты / Д. Т. Кузнецов – М.: Энергия, 1978. – 216 с.

2. Проблемы комплексного использования горючих сланцев Белорусской ССР / под ред. акад. АН БССР И. И. Лиштвана – Минск: Наука и техника, 1983. – 104 с.

3. Гаврилов, А. Ф. Энергетика на базе новых технологий использования низкосортных топлив / А. Ф. Гаврилов // Научно-исследовательский институт им. Кржижановского, Москва. – [www.mtu-net.ru/lge/cont.html](http://www.mtu-net.ru/lge/cont.html).

4. Бокун, И. А. Комплексное использование горючих сланцев Беларуси на основе их газификации в кипящем слое под давлением / И. А. Бокун // Энергетика: изв. высш. учеб. заведений и энергет. объединений СНГ. – 2006. – № 4. – С. 55–59.

5. Эвинг, П. В. Экономия материальных и топливно-энергетических ресурсов в производстве автоклавных материалов / П. В. Эвинг, А. Х. Эйбра, Р. Я. Киспр // Промышленность автоклавных материалов и местных вяжущих: обзор. информ. ВНИИЭСМ, 1984. – Вып. 2. – С. 1–50.

6. Эффективное использование промышленных отходов в производстве изделия из автоклавного ячеистого бетона / Ф. П. Кивисельг [и др.] // Строительные материалы. – 1984. – № 9. – С. 2–4.

7. Галибяна, Е. А. Автоклавные строительные материалы из отходов ТЭЦ / Е. А. Галибяна. – Л.: Стройиздат, 1986. – 128 с.