

2. На основании проведенных исследований создана инженерная методика расчета потерь теплоты через полы по грунту и заглубленные части ограждений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ч уд н о в с к и й, А. Ф. Теплофизика почв / А. Ф. Чудновский. – М.: Наука, 1976. – 352 с.
2. С п р а в о ч н и к по климату СССР: в 34 вып. – М.: Гидрометеоздат, 1964–1979.
3. Б у д ы к о, М. И. Тепловой баланс земной поверхности / М. И. Будыко. – Л.: Гидрометеоздат, 1956. – 255 с.

Представлена кафедрой  
теплогазоснабжения и вентиляции

Поступила 28.12.2006

УДК 662.67

### ПЕРСПЕКТИВЫ ЭНЕРГОХИМИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕЛОРУССКИХ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ

Кандидаты техн. наук ДУДАРЕВ В. В., СУХОЦКИЙ А. Б.,  
канд. хим. наук САКОВИЧ А. А.

*Белорусский государственный технологический университет*

Одним из путей обеспечения энергетической безопасности страны является максимальное использование возможностей местных органических топлив и альтернативных источников энергии. Наряду с утилизацией таких возобновляемых источников энергии, как солнечная, ветровая, гидроэнергия, для нашей страны может быть актуальна переработка биомассы, торфа, бурых углей и горючих сланцев.

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 82 %) минерального балласта, в составе которого содержится до 45 % кальциевых соединений, в том числе много карбонатов;
- высокой теплотой сгорания горючей массы (25–40 МДж/кг) вследствие значительного содержания водорода (до 8 %) в органической массе, хотя рабочая масса большинства сланцев имеет теплоту сгорания всего 4–9 МДж/кг;
- высоким (до 90 %) выходом летучих;
- повышенным (до 7 %) содержанием серы.

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 стране имеются запасы горючих сланцев, которые составляют

11 млрд т [1, 2]. Их общий потенциал – 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 пригодны 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 составляет около 1,1 м, глубина залегания – от 221 до 473 м, мощность слоев Туровского месторождения – около 1,2 м, глубина залегания – от 66 до 507 м. Эксплуатация Туровского 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  $C^p = 9,5\text{--}18,8\%$ ; водород  $H^p = 1,1\text{--}3,6\%$ ; азот  $N^p = 0,12\text{--}0,19\%$ ; кислород  $O^p = 0,8\text{--}16,0\%$ ; сера  $S^p = 1,5\text{--}7,0\%$ . Содержание золы  $A^p = 61,4\text{--}82,3\%$ , содержание влаги  $W^p = 5,8\text{--}10,6\%$ , выход летучих  $V^p = 80\text{--}90\%$ . Теплота сгорания – 4,2–9,6 МДж/кг.

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

- энергетическое – использование сланцев в качестве твердого топлива;
- энерготехнологическое – горючие сланцы подвергаются термическому разложению, в результате чего выделяются жидкие и газообразные горючие продукты: смола, газовый бензин, газ и др.;
- энергоклинкерное – пылевидные горючие сланцы сжигаются в топках котельных агрегатов с расплавом золы для получения клинкера высокомарочного сланцевого цемента;
- 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.

Использование сланцев в качестве топлива в электроэнергетике разных стран до сих пор не находило применения, за исключением Эстонии и России [1, 3]. Российскими специалистами были созданы электростанции на среднекалорийных (теплота сгорания – 8–9 МДж/кг) сланцах Прибалтики (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. Длительное время в России на Сызранской ТЭС работали 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.

Столь незначительное использование горючих сланцев в качестве топлива для электростанций объясняется низким КПД названных выше энергоустановок и значительными эксплуатационными трудностями. Это связано с тем, что по своим качествам сланцы не являются эффективным топливом из-за низкой теплоты сгорания и высокой зольности. Проектный расход топлива на отпущенную электроэнергию на энергоблоках составлял

409 г у. т./кВт·ч), что соответствовало КПД ТЭС всего 30 %; практически эти показатели были еще хуже.

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

Естественно, сжигание низкоэффективных белорусских сланцев 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 позволяет использовать горючие сланцы любой калорийности с удовлетворительными экологическими показателями. Однако такая технология ограничивает единичную мощность котла и недостаточно эффективна.

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. В [3] показана эффективность строительства ПГУ с внутрицикловой газификацией горючих сланцев в «кипящем» слое под давлением. С повышением давления в газогенераторе в реакционном объеме увеличивается плотность парогазовой смеси, что ведет к снижению габаритов газогенератора и снижению капитальных вложений, позволяет снизить расход электроэнергии на собственные нужды. Однако, так как горючие сланцы содержат серу, с целью предотвращения загрязнения окружающей среды продукты газификации должны подвергаться многоступенчатой очистке от золы и окислов серы.

**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:

- горючих – автобензина, моторного керосина, дизельного топлива, топочного мазута, высококалорийного газа, топочного масла;
- химических – шпалопропиточного масла, двухатомных фенолов, клеевых смол (фенолформальдегидных, эпоксидных, фенолспиртовых), электродного кокса, кукурсол-лака, моющего средства типол и др.

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

В 1970–1990 гг. Энергетическим научно-исследовательским институтом имени Кржижановского 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 [4]. 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 (рис. 1). 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 ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $N_2$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$  и др.) и коксозольный остаток.

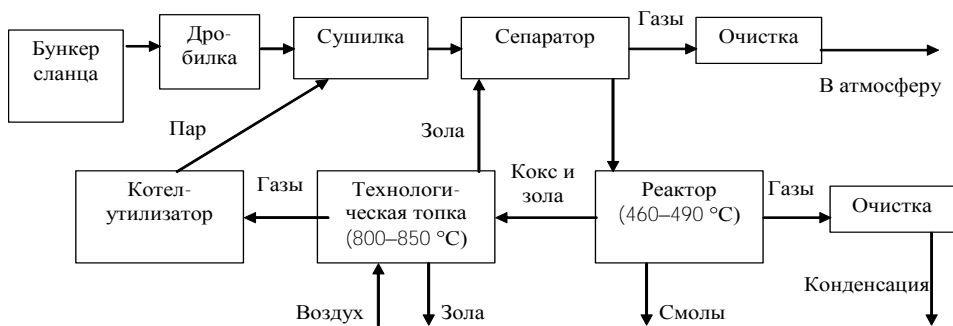


Рис. 1. Технологическая схема установки термического разложения сланца

Парогазовые продукты термического разложения горючего сланца проходят очистку от пыли в пылевой камере и отводятся в конденсационное устройство, где пары углеводородов 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. Коксовый остаток отводится из реактора пиролиза в аэрофонтанную топку, где его органические составляющие дожигаются в потоке воздуха. Выделившаяся при этом теплота используется для нагрева золы-теплоносителя и производства пара в котле-утилизаторе. Пар расходуется на собственные технологические и другие нужды. Важным этапом переработки сланцев является утилизация теплоты, отбираемой из топки золы, что позволяет повысить КПД процесса на 8–10 %.

Энергетическим институтом имени Г. М. Крижановского были проведены исследования технологической переработки белорусских сланцев. Получен следующий массовый выход продуктов термического разложения (температура в реакторе составляла 480 °С): 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 %, полукок – 86,3 %.

Важными показателями этой технологии являются доли потенциальной теплоты топлива:  $q_{\text{пгс}}$  – переходящая в парогазовую смесь и  $q_{\text{кзо}}$  – остаю-

щаяся 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 % потенциальной теплоты 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:**

- при термическом разложении горючего сланца в атмосферу выбрасывается в 5–6 раз меньше газов, чем при сжигании натурального сланца;
- в дымовых газах технологической топки сернистый газ практически отсутствует. Объясняется это активным соединением окислов серы с известью при температуре  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ . Таким образом сера концентрируется в золе – до 90 %, а в смоле и газе – менее 10 %.

**Утилизация сланцевой золы.** Положительным эффектом сжигания сланцев может стать утилизация зольного остатка. Химический состав золы белорусских горючих сланцев [2]:  $\text{SiO}_2 = 20\text{--}53,2 \%$ ;  $\text{CaO} = 7,5\text{--}45,0 \%$ ;  $\text{TiO}_2 = 0,30\text{--}0,93 \%$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 6,1\text{--}17,6 \%$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4,1\text{--}11,7 \%$ ;  $\text{MgO} = 1,7\text{--}7,2 \%$ ;  $\text{K}_2\text{O} = 1,1\text{--}6,3 \%$ ;  $\text{Na}_2\text{O} = 0,15\text{--}0,63 \%$ . Такой состав позволяет использовать золу в производстве строительных материалов. Из крупных фракций летучей золы возможно изготовление ячеистых бетонов и силикатных изделий, из мелких – вяжущие материалы: кукермит-цемент, портланд-цемент. Помимо строительных материалов сланцевая зола может применяться в дорожном строительстве, а также в сельском хозяйстве для нейтрализации кислых почв. 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 и других отраслях народного хозяйства:

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

**Каждое из этих направлений определяется физико-механическими свойствами сланцевых зол, улавливаемых в различных золоулавливающих устройствах (циклоны, электрофильтры 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, 7]. По сравнению с типовой технологией производства ячеисто-бетонных изделий экономический эффект от производства сланцеугольных газобетонных изделий (плотность –  $600\text{--}700 \text{ кг/м}^3$ ) образуется за счет применения более дешевого сырья. Согласно [5] в результате использования сланцевой золы на каждом кубо-

метре 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 Беларуси до 100 тыс. т цемента и до 120 тыс. т извести.

В производстве высокомарочного портландцемента наиболее целесообразно применять мелкозернистые золы, обогащенные  $\text{CaSO}_4$ . В этом случае используется и эффект гидратации  $\text{CaSO}_4$  с образованием гипса  $\text{CaO} \cdot \text{SO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , что приводит к быстрому схватыванию и твердению.

Сланцезольный портландцемент получается совместным помолом клинкера и сланцевой золы. В результате можно получать сланцезольный 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 область), ОАО «Красносельскстройматериалы» (г. п. Красносельский, Гродненская область), ПРУП «Кричевцементношифер» (г. Кричев, Могилевская область). Химический состав портландцемента с минеральными добавками марки 500 ПЦ500-Д20 ПРУП «Кричевцементношифер»:  $\text{SiO}_2 = 20,65\text{--}22,50 \%$ ;  $\text{CaO} = 56,45\text{--}62,95 \%$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 5,54\text{--}6,10 \%$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4,10\text{--}4,92 \%$ ;  $\text{MgO} = 0,82\text{--}1,64 \%$ ;  $\text{K}_2\text{O} = 0,65\text{--}0,73 \%$ ;  $\text{Na}_2\text{O} = 0,20\text{--}0,32 \%$ ;  $\text{SO}_3 = 1,5\text{--}3,5 \%$ . Основными сырьевыми компонентами цемента являются: мел ( $\text{CaO}$ ), глина ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ) и пиритные огарки ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Как видно из сравнения химических составов портландцемента и сланцевой золы, последняя содержит необходимое для производства цемента количество  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . 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 потребовать около 1 млн т сланцевой золы, что соответствует утилизации 1,2 млн т сланцев, или 0,246 млн т у. т. в год (что сопоставимо с энергией, которую планируют получать в Беларуси к 2010 г. в солнечной и вертроэнергетике).

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

Приблизительная оценка стоимости энергии при утилизации горючих сланцев на цементном производстве сводится к следующему расчету. Сред-

няя теплота сгорания сланцев Любанского 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 1 т сланцев составит 10 у. е. После пиролитической переработки сланцев (стоимость – около 3 у. е./т) в установке с КПД 92 % и долей потенциальной теплоты топлива переходящая в парогазовую смесь  $q_{\text{пгс}} = 70\%$  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 13 у. е., что соответствует 99 у. е. за 1 т у. т., или 120 у. е. за 1 тыс. м<sup>3</sup> природного газа. Следует отметить, что мировая цена на природный газ в 1,5–2 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 технологической теплоте (из расчета 220 кг у. т. на 1 т 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, а после поверхностной обработки битумными материалами образуется устойчивая и непылящая дорога (расход золы составляет в среднем 450 т на 1 км).

Ввиду того, что сланцевые золы содержат значительное количество свободного СаО, а также некоторое количество полезных для растений калия и микроэлементов, их с успехом можно использовать для известкования кислых почв.

**Целесообразность промышленного освоения горючих сланцев в Республике Беларусь.** 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 комплексов 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.

Производство таких продуктов, как бензол, толуол, сольвент, а также фенолов, кетонов и кислот путем пиролиза газового бензина, не должно вызывать больших сложностей, поскольку в стране имеются опытные специалисты и технологии нефтеперерабатывающих заводов. Потребность этих химических элементов также не вызывает сомнения, однако их вклад в повышение рентабельности предприятия скорее всего будет незначителен из-за небольшого объема производства.

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 Беларуси имеются значительные и возникнут еще большие

потребности в вяжущих материалах. Использование сланцевой золы может осуществляться для производства материалов для дорожного и промышленного строительства. При этом утилизация сланцевой золы в цементном производстве может осуществляться в крупных масштабах.

В области сельского хозяйства применение сланцевой золы для улучшения структуры торфяных почв также может быть сопряжено с большими объемами. В настоящее время в республике насчитывается 700 тыс. га торфяных почв, улучшение плодородия которых может быть обеспечено внесением в них более 1 млрд т сланцевой золы.

## ВЫВОД

Возможность использования горючих сланцев рассматривалась в СССР еще в середине XX в. Однако на тот период их использование было неэффективно 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. 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 энерг. объединений СНГ). – 2006. – № 4. – С. 55–59.
4. Гаврилов, А. Ф. Энергетика на базе новых технологий использования низкосортных топлив / А. Ф. Гаврилов // ЭНИН им. Кржижановского, Москва – [www.mtu-net.ru/lge/cont.html](http://www.mtu-net.ru/lge/cont.html).
5. Эвинг, П. В. Экономия материальных и топливно-энергетических ресурсов в производстве автоклавных материалов / П. В. Эвинг, А. Х. Эйбра, Р. Я. Киспр // Сер. 8. Промышленность автоклавных материалов и местных вяжущих: обзор. инфом. / 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.

Представлена кафедрой энергосбережения,  
гидравлики и теплотехники

Поступила 4.04.2007