

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЯДЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ ВТГР В УКРАИНЕ

В.Ф. Зеленский, Н.П. Одейчук, Г.В. Зима

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: winter@kipt.kharkov.ua, тел. +38(057)335-64-02

Исходя из тенденций развития мировой энергетики указана возрастающая роль углей в топливно-энергетическом комплексе, что особенно важно для Украины. Рассмотрены основные применяемые методы газификации углей для производства жидкого синтетического топлива. Подчёркнута перспективность применения ректоров ВТГР для усовершенствования указанных технологий.

Рост масштабов производства и технический прогресс определяют необходимость постоянного увеличения потребления энергии.

Вопреки активному поиску и широкому внедрению альтернативных источников энергии (ветроэнергия, нетрадиционная гидроэнергия, термальная, приливная, солнечная, идея управляемого термоядерного синтеза, применение водорода в качестве топлива) на сегодняшний день [1] около 90% вырабатываемой в мире энергии дает сгоревшее ископаемое топливо.

Несмотря на огромное разнообразие видов топлива, основными источниками энергии остаются нефть, природный газ, уголь. Также значительны запасы ядерного топлива (ресурсы урана по энергетическому эквиваленту существенно превосходят запасы химического топлива, но его использование выдвигает значительные требования к безопасности, затраты на подготовку к эксплуатации и утилизацию отработанного топлива). Кроме того, достаточно велики запасы

углеводородного сырья в битуминозных песках и горючих сланцах (превышают запасы нефти и газа в 3 и 8 раз).

Нефтяное топливо и природный газ, обладающие особой ценностью как для основных потребителей энергии (удобство перевозки, промышленные мощности и оборудование ориентированы на потребление жидкого топлива), так и для химической промышленности, исчерпаемы в ближайшем будущем. Поэтому, несмотря на наличие больших общих запасов энергетических ресурсов, серьёзную проблему представляет несоответствие сложившейся структуры потребления отдельных видов топлива их запасам. Прогнозные запасы химического топлива около 12 800 млрд. т условного топлива (т у.т.), из которых уголь составляет примерно 11 200 млрд. т у.т., нефть – 740 млрд. т у.т. и природный газ – 630 млрд. т у.т. [2]. Картина же объёма потребления иная (рис. 1, 2) [3].

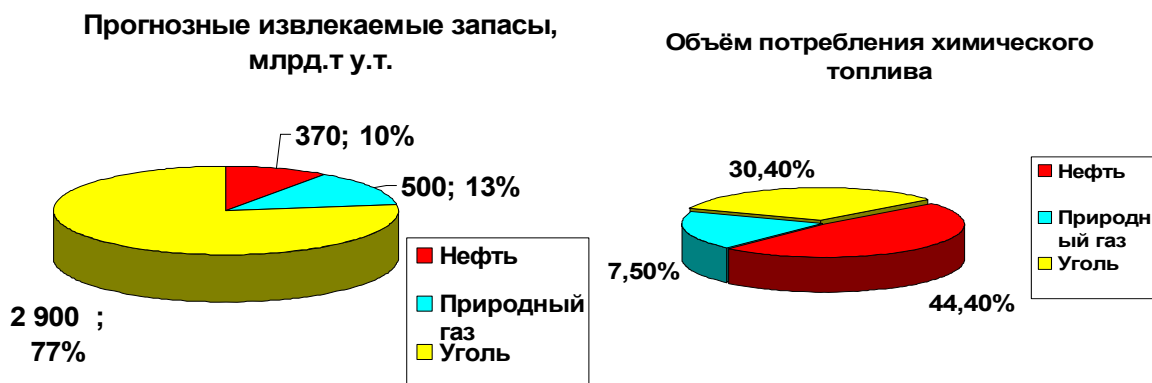


Рис. 1. Соотношение прогнозных извлекаемых запасов химического топлива и их потребления

Ограниченность запасов нефти и газа в условиях постоянного роста их потребления привела к быстрому росту цен на них. В 2008 году экспертами Международного валютного фонда (МВФ) ожидалось некоторое снижение темпов экономического роста в странах организации

экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), однако для Китая и Ближнего Востока, которые считаются главными регионами роста потребления нефти [4], прогнозировалось сохранение стабильных темпов экономического роста.

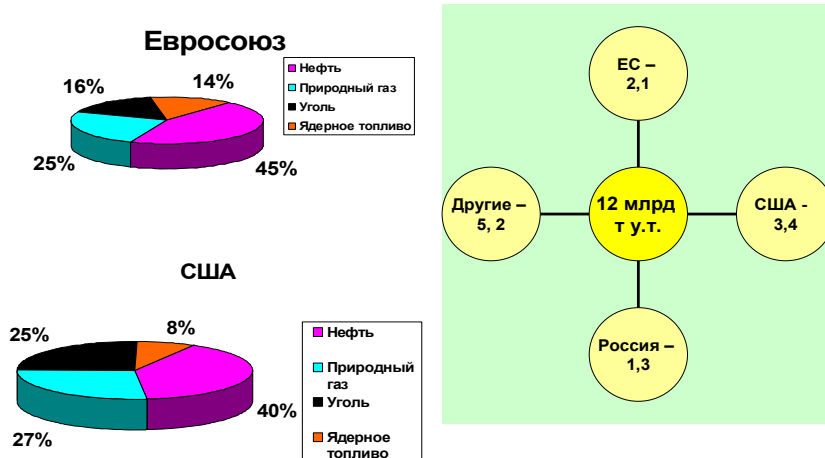


Рис. 2. Объём потребления ископаемого топлива

В противоположность нефти и газу запасы угля весьма велики и рассредоточены по различным районам мира. В 20 веке было отмечено вытеснение угля другими энергоресурсами. Если в 1925 г. более 80 % всех энергетических потребностей удовлетворялось углем, то в 1995 г. доля угля во всей использованной первичной энергии составила порядка 30%. При этом наблюдаются существенные качественные региональные отличия потребления ископаемого топлива. Так, например, в России доля природного газа составляет 53 % энергопотребления (18% мирового потребления), нефти – 17 %, а в Китае лишь 2% энергопотребления приходится на природный газ, 15 % - на нефть и до 80 % - на уголь [5].

Анализ тенденций развития мировой энергетики свидетельствует о том, что в обозримой перспективе роль угля в топливно-энергетическом комплексе (ТЭК) будет неуклонно возрастать.

Этот факт особенно актуален для Украины, поскольку в нашей стране доля угля в энергоресурсах составляет 96 % [6], а его запасов хватит более чем на 400 лет. Кроме того, газ и нефть для Украины являются критическим импортом, а использование атомной энергетики сопряжено с целым рядом серьёзных проблем: импорт свежего топлива, захоронение отработанного топлива, выработка ресурса реакторов к 2020 году, безопасность, влияние на экологию и т.д. В связи с вышеизложенным напрашивается однозначный вывод о перспективности для Украины использования угля как одного из основных видов топлива.

Но вследствие отрицательного влияния экономических, экологических, региональных факторов реализация намечающейся мировой тенденции к широкому использованию твёрдого топлива в первичном виде в энергетике и для технологических нужд будет затруднена. Различные отрасли промышленности в течение многих десятилетий развивались на применении газожидкостного топлива. Технически многие процессы в металлургической, химической и других

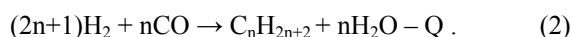
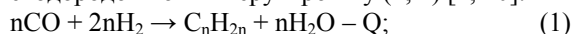
отраслях промышленности, использование топлива в энергетике, на транспорте, в быту основывались на применении газа, нефти и продуктов её переработки. Поэтому необходима коренная перестройка производства и потребления жидкого и газообразного топлива и создание рентабельных процессов превращения угля в удобное для потребления жидкое и газообразное топливо [2].

Проблема получения жидкого топлива из угля не нова, но весьма актуальна. Ожижение угля началось в 30-40 годах 20 века. Разработкой эффективных процессов ожижения угля занимались многие страны: США, Германия, ЮАР, Япония, СССР, Китай, Великобритания, Дания, Норвегия. В настоящий момент мировым лидером по производству синтетического топлива является Южно-африканский химический концерн "Sasol" (ежегодный расход угля для получения жидкого топлива составляет 36 млн. т, производительность только заводов "Sasol-2" и "Sasol-3" составляет 3,8...4 млн. т углеводородов в год) [7]. Расширяется сфера применения синтетического жидкого топлива - ВВС США приступили к активным испытаниям синтетического авиационного топлива. По некоторым оценкам до 2010 года мировой объём производства синтетического жидкого топлива в мире может достигнуть порядка 30 млн. т в год [8].

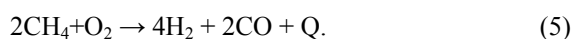
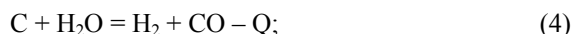
В Украине ведутся разработки и полупромышленные испытания установки по получению моторного топлива из шламов углеобогатительных фабрик, которая разработана рядом организаций совместно с Центром химических технологий Академии инженерных наук Украины [9]. Оцениваемая средняя производительность модульной промышленной установки по производству жидкого синтетического топлива – 500 тыс. т в год. Рентабельным производство синтетического топлива становится, когда его цена и цена природного топлива приблизительно равны.

Производство жидкого синтетического топлива основано на прямой гидрогенизации угля, т.е. повышении содержания в угле или горючем сланце

водорода, путём его подачи извне и на синтезе углеводородов по Фишеру-Тропшу (1, 2) [2, 10]:



CO и H₂ получаются при парокислородной газификации угля (3, 4), либо при паровой конверсии метана (5):



Для прямой гидрогенизации угля требуется водород, получение которого из угля традиционными методами связано со значительными затратами. Во всех методах газификации для получения H₂ необходимо сжечь для обеспечения процесса теплом порядка 50% (40% в случае использования газа) исходного топлива.

В настоящее время основными применяемыми методами газификации угля являются [2, 10]:

1. Метод Лурги – в стационарном слое. Основное преимущество – гибкость процесса и возможность обеспечения лучших технологических условий, дающих возможность сократить расход кислорода, применение газогенераторов под давлением, прослуживших самый длительный срок в промышленности. Недостатки процесса -

образование смол и фенолов, усложняющих технологическую схему, а также необходимость применять только кусковой уголь. Метод Лурги считается наиболее перспективным в настоящее время. КПД газификации 75...80 %.

2. Метод Винклера – в псевдоожиженном или кипящем слое. Преимущества процесса – к углю можно добавлять жидкие углеводороды; не образуются жидкие побочные продукты. Недостатки процесса – низкое давление, необходимое для получения высококалорийного газа, может потребоваться сушка угля, большой унос топлива, ограниченность по температуре (зола не должна размягчаться). КПД газификации составляет 58...65 %.

3. Метод Копперса-Тотцека – в движущемся слое, т.е. газификация угольной пыли в прямоточном процессе, которая характеризуется высокой температурой и повышенным расходом кислорода. Можно использовать практически любое твёрдое топливо. Используется для получения газа для технологических синтезов. Преимущества процесса – отсутствие побочных продуктов, кроме шлака и серы, разнообразное сырьё, лёгкая регулировка CO и H₂. Недостатки процесса – низкое давление, требуется кислородный завод, высокая температура (1650 °C). КПД газификации 69...75 %.

Основные характеристики указанных процессов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные показатели промышленных процессов газификации твёрдого топлива на парокислородном дутье

Метод	Вид газификации	Основное топливо		Температура газификации, °C	Объёмный состав газа, %					Производительность по сырью газу, тыс. н. м ³ /ч
		Вид	Крупность частиц, мм		CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂	
Винклера при атмосферном давлении	Кипящий слой	Бурый уголь	0,5...3	1000	25	33	40	1	1	100
Винклера под давлением	Кипящий слой	Бурый уголь	0,5...3	1000	8,9	51,8	35,3	3,2	0,7	100
Лурги под давлением (2,0...2,5 МПа)	Стационарный слой	Бурый и каменный уголь	2...10	1100	33	13	35	17	2	50
Копперса-Тотцека при атмосферном давлении	Движущийся слой	Бурый и каменный уголь	0,08	1500	13	51	34	-	2	50

На базе указанных методов газификации угля построенные в мире установки перерабатывают примерно 11 млн. т угля, производя свыше 20 млрд. н. м³ газа. Существуют две принципиально различные методики газификации, приведенные в

табл. 2, основанные на внутренней и внешней подаче тепла.

Исследования и математический анализ реакций, протекающих в процессах газификации, показывают, что тепла, выделяющегося при протекании экзотермических реакций сгорания угля,

не хватает для обеспечения эндотермических реакций его взаимодействия с CO_2 и H_2O . Отсюда - высокое содержание CO_2 в продукте. Для интенсификации реакций необходимо осуществить дополнительный подвод тепла в газогенератор.

Подвод высокотемпературного тепла (необходимого для гидрогенизации угля и переработки жидких продуктов) [10] в реакционную

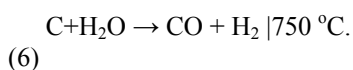
зону газогенератора – ключевая проблема дальнейшего совершенствования технологии газификации угля. Внешний источник позволяет организовать паровую газификацию угля при $T \sim 900 \dots 1000$ °С для получения синтез-газа и H_2 . Весьма перспективно для этого использовать тепло ядерных реакторов.

Таблица 2

Методики газификации угля

Подача тепла	Внутренняя	Внешняя
Способ подачи тепла для газификации	Сжигание и газификация угля происходят в одном аппарате	Тепло подаётся через систему встроенных теплообменников, подводящих энергию от стороннего источника (ВТГР)
Методика газификации	Газификация за счёт сжигания части углерода топлива в газогенераторе (методы Лурги, Винклера, Копперса-Тотцека)	Бескислородная газификация за счёт восстановления H_2O , CO_2 , MeO и окисления углерода

Метод газификации угля с использованием тепла ядерного реактора заключается в следующем. В газогенераторе с флюидным слоем под давлением 4 МПа с внутренним нагревом циркулирующим гелием газифицируется подсушенный каменный уголь (200 кг/ч) с размером частиц менее 0,1 мм при $T = 750$ °С:



Получают газ следующего объёмного состава:

H_2 – 60 %, CO - 19 %, CO_2 - 19 %, CH_4 – 2 %.

Предполагается, что большое содержание CO_2 получается вследствие низкой температуры процесса. Решением проблемы видится увеличение температуры до 950 °С.

Наращивание энергетического потенциала в перспективе и в свете имеющейся ситуации с ископаемым топливом представляется наиболее вероятным на базе ядерной энергии. Прогресс в процессе газификации угля неразрывно связан с применением высокотемпературных газовых реакторов (ВТГР) для получения жидкого и газообразного синтетического топлива из углей. Реакторы ВТГР [11, 12] - это новый тип экологически чистых универсальных атомных энергоисточников, уникальные свойства которых - способность вырабатывать тепло при температурах более 1000 °С и высокий уровень безопасности - определяют широкие возможности их использования для производства в газотурбинном цикле электроэнергии с высоким КПД и для снабжения высокотемпературным теплом и электричеством процессов производства водорода, опреснения воды, технологических процессов химической, нефтеперерабатывающей, металлурги-

ческой и прочих отраслей промышленности. Температура теплоносителя порядка 1000 °С на выходе ВТГР, используемого в качестве внешнего источника тепла, является достаточной для проведения процессов газификации Лурги, Винклера и т.д. с организацией их на дутье водяного пара (вместо парокислородного дутья) для получения синтез-газа, используемого для получения жидких продуктов по Фишеру-Тропшу, метанола, метана и прочих химических продуктов и водорода (рис. 3, 4, 5).

При этом менее освоенные, сравнительно с ВВЭР, реакторы ВТГР характеризуются стабильностью работы при высоких температурах (до 950 °С), надёжностью и безопасностью в эксплуатации. Кроме того, КПД реакторов ВТГР достигает 50 %, тогда как ВВЭР - не более 33%. Вследствие хороших нейтронно-физических характеристик ВТГР обладают более экономичным топливным циклом, что с учётом высокого КПД даёт меньший расход урана на выработку одного количества энергии по сравнению с ВВЭР. Поэтому высокопотенциальная энергия ВТГР по стоимости становится сравнимой, а то и ниже, чем энергия эксплуатируемых в настоящее время электростанций, в том числе и атомных.

В комбинированном процессе паровой газификации угля, производства H_2 и гидрогенизации угля для получения жидкого синтетического топлива с использованием тепловой энергии ВТГР высокотемпературная тепловая энергия ВТГР в диапазоне температур от 600...750 до 950 °С расходуется на паровую газификацию или конверсию метана. Низкопотенциальная часть тепловой энергии (от 300 до 750 °С) расходуется на производство и разогрев пара для процесса газификации и на производство электроэнергии.

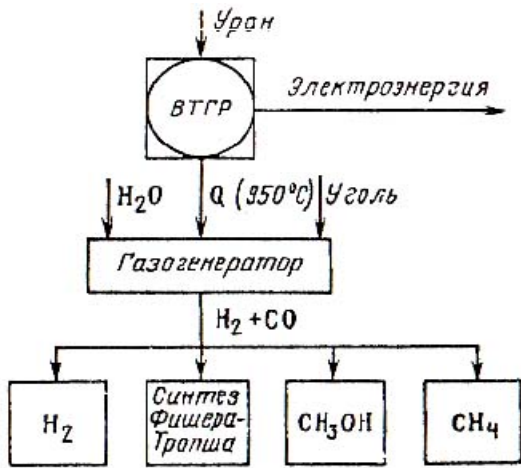


Рис. 3. Производство синтетического топлива с использованием ВТГР в качестве внешнего источника тепла

В процессах получения синтетического топлива из угля это тепло может использоваться для производства H_2 термоокислительным методом и конверсией CO и для сочетания указанных процессов с гидрогенизацией угля для получения жидкого топлива. Доля тепла реактора, используемая непосредственно в процессе газификации, растёт с увеличением температуры газа на выходе из реактора, что, в свою очередь, повышает КПД процесса (рис. 6). Следует отметить, что достаточно высокий суммарный КПД процесса, определяемый формулой [2]

$$\eta = \frac{\text{Тепло в продукте} + \text{Электроэнергия}}{\text{Тепло в угле} + \text{Энергия ВТГР}}$$

(7)

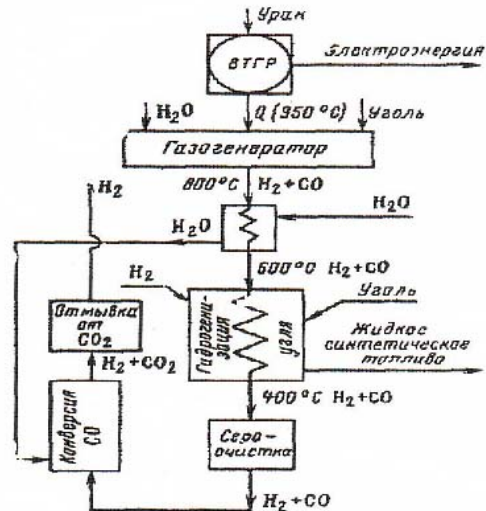
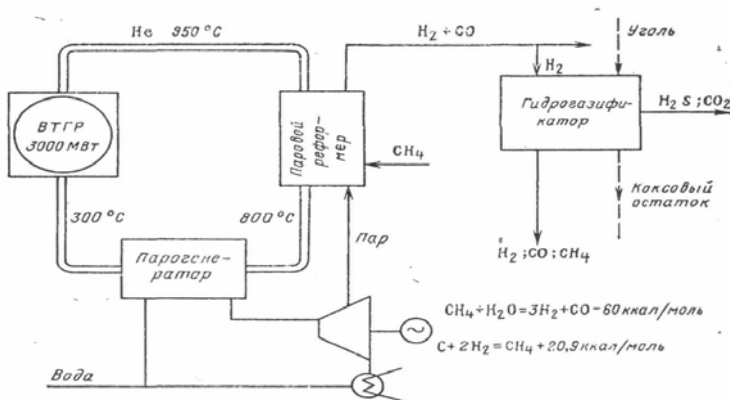


Рис. 4. Комбинированный процесс паровой газификации угля, производства H_2 и гидрогенизации угля для получения жидкого синтетического топлива

и достигающий 50...60% при $T=950^\circ C$, при повышении температуры до $1100^\circ C$ можно увеличить до 65...70% (см. рис.6). Однако для этого необходимо решить ряд конструкционных проблем теплообменных устройств и средств передачи тепловой энергии реактора ВТГР в газогенератор, в котором происходит газификация угля.

Перспективность рассмотренных процессов очевидна. Но для организации крупномасштабного и рентабельного производства синтетического топлива из угля с применением тепла ядерного реактора ВТГР необходимо конструирование газогенераторных установок производительностью до 400 тыс. н. м³ газа в час и решение ряда сложных вопросов в области создания собственно ядерных реакторов ВТГР, систем транспорта тепла, высокотемпературных теплообменников и прочее.

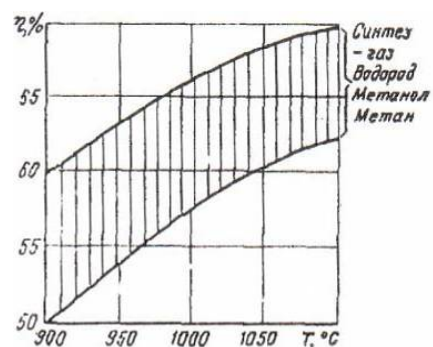


Рис. 5. Гидрогазификация угля с использованием тепловой энергии ВТГР

Развитие направления ВТГР особенно актуально для Украины с учетом возможности применения высокопотенциальной энергии ВТГР для производства водорода, который в настоящее время

рассматривают в качестве топлива будущего и синтетического жидкого топлива из угля. В данный момент существует два направления промышленного получения водорода – электролиз

(очень энергоёмкий процесс) и плазмохимия (путём разложения воды или углекислого газа). Но стоимость водорода, получаемого указанными методами, весьма велика. Проводились эксперименты по диссоциации сероводорода в плазме, чтобы на одной стадии получить два продукта: водород и конденсированную серу [1]. Учитывая практически неисчерпаемые запасы сероводорода в Чёрном море, указанная методика представляется интересной для разработки в Украине, однако для её осуществления необходимо решить ряд серьёзных технологических задач по добыче сероводорода, его транспортировке к

плазмохимическим производственным мощностям и собственно конструкционно-техническое выполнение таких производств.

Для производства же синтетического топлива из угля Украина имеет значительные запасы исходного сырья. Наша страна имеет в своем распоряжении более 3,5 млрд. т балансовых запасов бурого угля, большая часть которых может добываться наиболее эффективным открытым способом. Основные разведанные месторождения бурого угля находятся в Кировоградской (790 млн. т), Днепропетровской (1050 млн. т) и Харьковской (Ново-Дмитриевское месторождение 390 млн. т) [13] областях (рис.7).

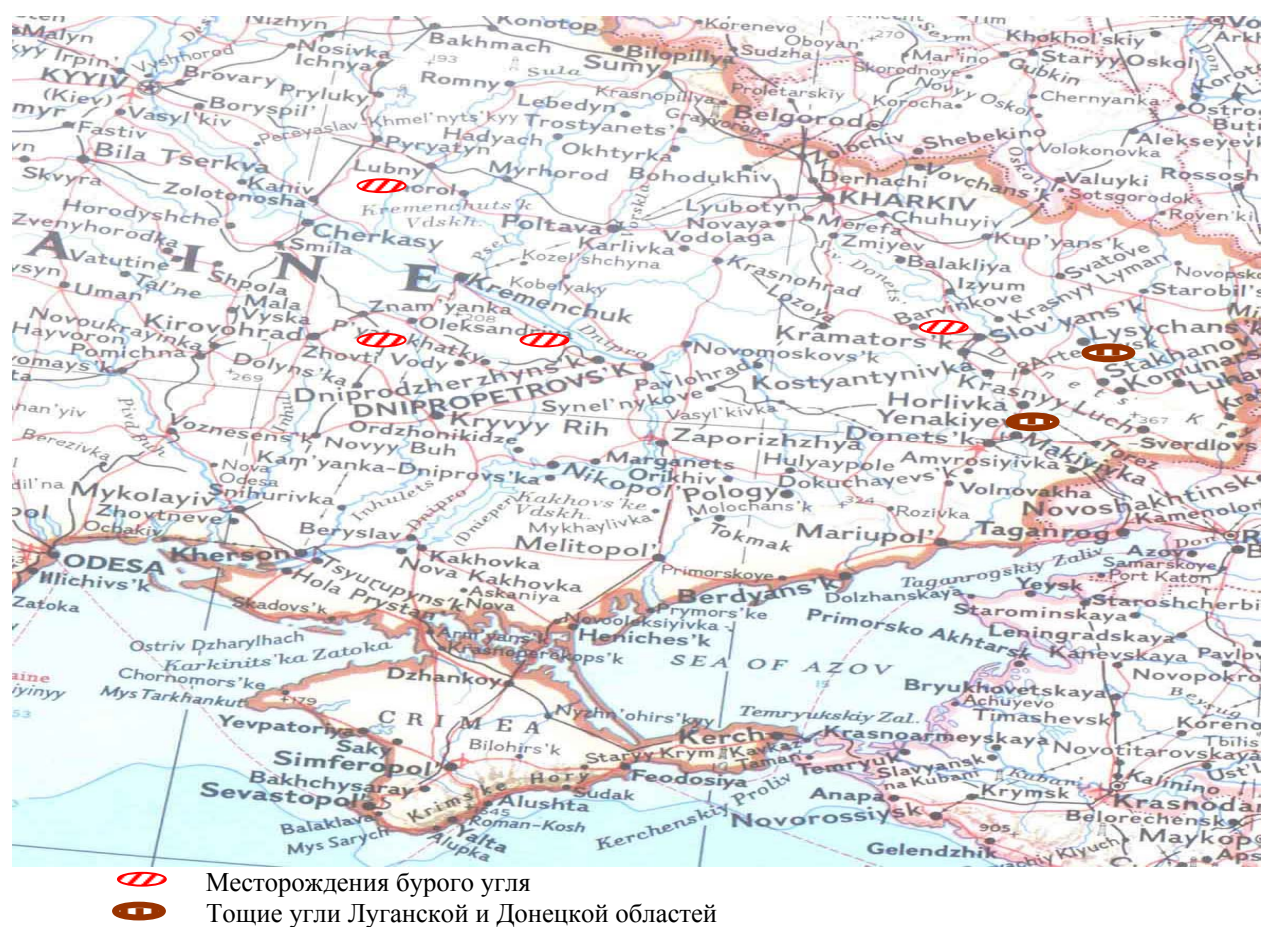


Рис. 7. Разведанные месторождения бурого угля в Украине

При этом указанные месторождения характеризуются эргономичностью расположения. Так Ново-Дмитриевское месторождение бурого угля расположено на юге Харьковской области в Барвенковском районе в 40...50 км от городов Славянск, Краматорск, Дружковка и в 40 км от города Изюм Харьковской области, где имеются крупные промышленные предприятия и избыток на сегодня квалифицированной рабочей силы. В 12 км к юго-западу от месторождения находится железнодорожная станция и город Барвенково Харьковской области. В 8 км к югу проходит железная дорога Славянск–Харьков, в 12 км к западу - автотрасса Барвенково–Изюм.

Угольное месторождение имеет площадь около 12 км².

Основные достоинства осмотренных мест для размещения промышленных площадок:

- использование земель, не пригодных для сельскохозяйственных угодий, что резко снижает их стоимость;
- площадка достаточно удалена от жилой зоны и поэтому не требует затрат на создание санитарно-защитной зоны, что также удешевляет стоимость строительства комбината;
- рядом с предлагаемой площадкой имеются большие резервные территории, непригодные для использования в сельском хозяйстве, но дающие

перспективу для расширения предприятия и строительства других производств;

- вблизи предлагаемой промышленной площадки проходят железная дорога и автотрасса, что позволит легко организовать вывоз полученной продукции в любой регион страны.

После выхода на максимальную мощность в год возможна добыча и переработка 2,4 млн. т угля. Комплекс по получению моторного топлива парокислородной газификацией измельченного угольного сырья на Ново-Дмитриевском месторождении бурого угля в Харьковской области, выводимый на полную мощность поэтапно, через 5,5 лет после начала строительства сможет выдавать 407 тыс. т бензина, 140 тыс. т дизтоплива и около 80 тыс. т котельного топлива [13].

Таким образом, очевидна перспективность развития указанных направлений поиска энергоисточников, разработки и совершенствования конструкционно-технологических параметров реакторов ВТГР для использования их в процессах получения синтетического топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Зуев. Панацея или утопия // *The Yonge stret review. Internet issue.* 10.10.2006. <http://www.newcanada.com>.

2. В.Н. Гребенник, Н.Н. Пономарёв-Степной, В.В. Лебедев, В.П. Давыдов. Перспективы производства жидких и газообразных синтетических топлив из угля и использование энергии ядерного реактора // *Атомно-водородная энергетика и технология.* М.: «Энергоиздат», 1982, в. 4, с. 23-59.

3. *Уровень и структура потребления топлива.* <http://ru.wikipedia.org>.

4. МЭА: Потребление нефти в мире в 2008 г. снизится до 87,6 млн бар./день // *РБК Украина.*

Информационное агентство. 13.02.2008. <http://www.rbc.ua>.

5. *Структура потребления энергии в России и мире.* <http://ehighenergy.info/st.htm>.

6. К. Ткачук. Прорыв на главном направлении: Интервью заместителя директора Национального научно-исследовательского института охраны труда по научной работе // *«Рабочая газета»* 16.08.2002, № 120, официальный сайт Минтопэнерго Украины. <http://mpe.kmu.gov.ua>.

7. История синтеза Фишера-Тропша // *НПО «Синтез».* <http://synthesgtl.com>

8. В. Гаврилов. Синтетика вместо нефти // *РБК – daily.ежедневная деловая газета.* 05.03.2007. <http://www.rbcdaily.ru>.

9. Информационный канал // <http://subscribe.ru>.

10. Г.Ю. Валуконис, В.Н. Жуйборода, Ю.А. Кононов. Производство жидкого синтетического топлива // *Материалы Международной инвестиционной научно-практической конференции: «Производство синтетического моторного топлива из угля Донецкого бассейна, как составляющая энергетической безопасности Европы».* Украина, Луганск, 2005, с. 138 - 151.

11. Н.Н. Пономарёв-Степной, А.Я. Столяревский. Атомно-водородная энергетика // *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology ISJAEЕ.* 2004, № 3(11).

12. Н.Н. Пономарёв-Степной, А.Я. Столяревский. Атомно-водородная энергетика – пути развития // *Энергия.* 2004, № 1, с. 3-9.

13. Ю. Оршанский. Инвестиционное развитие Харьковской области целесообразно ориентировать на использование природных и производственных ресурсов, а не на развитие торгующих структур: Интервью информационному агентству Status Quo. <http://www.sq.com.ua>.

Статья поступила в редакцию 10.09.2008 г.

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЯДЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ НА ОСНОВІ ВТГР В УКРАЇНІ

В.Ф. Зеленський, М.П. Одейчук, Г.В. Зима

Виходячи з тенденцій розвитку світової енергетики зазначена зростаюча роль вугілля у паливно-енергетичному комплексі, що є особливо важливим для України. Розглянуто основні застосовувані методи газифікації вугілля для виробництва рідких синтетичних палив. Підкреслено перспективність застосування реакторів ВТГР для вдосконалення зазначених технологій.

PERSPECTIVES OF NUCLEAR-TECHNOLOGICAL COMPLEXES ON THE HTGR BASE APPLICATION IN UKRAINE

V.F. Zelenskiy, N.P. Odeychuk, G.V. Zyma

Proceeding from tendencies of development the world power, the increasing role of coals in a fuel and energy complex, that is especially important for Ukraine, is specified. The basic applied methods of coals gasification for manufacture liquid synthetic fuel are considered. Perspectives of application the HTGR reactors for improvement the specified technologies are underlined.