

УДК 621.43

**С.И. СЕРБИН**, д-р техн. наук; проф. Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев;  
**Н.А. ГОНЧАРОВА**, аспирант Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев

### **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЕЙ РАЗЛИЧНОГО МОРФОЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА**

Статья посвящена теоретическим исследованиям процессов газификации углей с различным составом газифицирующих агентов. Для прогнозирования характеристик процессов газификации углей различного состава использована модель термодинамического равновесия. Определены основные параметры и оптимальные условия процессов газификации углей.

**Ключевые слова:** газификация, уголь, синтез-газ, равновесный состав, плазма.

**Введение.** Одним из перспективных источников получения синтез-газа является термическая переработка угля – его газификация. По типу дутья газификация углей делится на воздушную, кислородную, кислородно-паровую, паровую [1–5]. Актуальной задачей является разработка эффективной комплексной технологии преобразования угля в газообразное топливо с получением горючих газов ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) и возможностью его дальнейшего применения в камерах сгорания ГТД.

В зависимости от способа газификации, состава дутьевого потока и условий газификации, давления, морфологического состава угля и его реакционной способности возможно получение синтез-газа различного назначения.

**Основная часть.** Целью исследований является определение составов продуктов плазменной газификации углей различных месторождений и их зависимостей от массового содержания реагентов для дальнейшего технико-экономического анализа целесообразности применения плазменных технологий переработки углей. Исследовались три способа плазменной газификации: воздушная, кислородная и кислородно-паровая. Проанализированы три различных варианта кислородно-паровой газификации, отличающиеся различным соотношением по массе количества водяного пара, отнесенного к количеству смеси водяного пара и кислорода в системе – 20, 36 и 49 %.

Рассмотрены следующие виды углей: энергетический экибастузский каменный уголь (вариант 1) и талдыкольский уголь Майкубенского месторождения для коммунально-бытовых нужд (вариант 2).

При определении содержания продуктов газификации углей различного морфологического состава предполагалось, что продукты газификации находятся в термодинамическом равновесии. Расчеты равновесного состава термодинамических систем проведены с использованием программного обеспечения *TERRA* [6]. Все расчеты проведены применительно к 1 массовой части угля.

В расчетах варьировалось массовое содержание окислителя в диапазоне, соответствующем изменению коэффициента избытка окислителя  $\alpha$  в смеси от 0,1 (переобогащенная углем смесь) до 1,0 (стехиометрия). Расчетное давление газификации 0,1 МПа.

Во всех расчетах тепловая мощность плазменной струи равнялась 50 кВт, что эквивалентно примерно 1 МВт тепловой мощности перерабатываемого угля. При рабо-

© С.И. Сербин, Н.А. Гончарова, 2013

те плазменного генератора на різних середовищах середньінтегральна температура плазменної струї вважалась постійною і рівною 4500 К. Початкова температура повітря і кисню полагалась рівною 300 К, водяного пару 400 К.

Склад вугля варіанта 1 (по масі, %): С = 49,2; Н = 3,0; N = 0,9; O = 26,4527; S = 0,4282; Si = 12,1533; Al = 5,0808; Fe = 1,5387; Ca = 0,5718; Mg = 0,1689; Ti = 0,2158; Na = 0,1039; K = 0,1162; P = 0,0698. Зольність на суху масу 40,0 %, вологи 5 %. Вища теплота спалення 17610,14 кДж/кг.

Склад вугля варіанта 2 (по масі, %): С = 57,1216; Н = 3,8; N = 1,8605; O = 24,5098; S = 0,8587; Si = 6,3573; Al = 2,9560; Fe = 1,0441; Ca = 0,8360; Mg = 0,4924; Ti = 0,1637. Зольність на суху масу 24,0 %, вологи 18,0 %. Вища теплота спалення 19119,81 кДж/кг.

На графіках складу продуктів плазменної газифікації (рис. 1–4) по осі ординат приведено масове вміщення окислювача, відповідно для повітря (формула  $N_{54.6404}O_{14.6673}$ ), кисню (формула  $O_2$ ) і водяного пару (формула  $H_2O$ ).

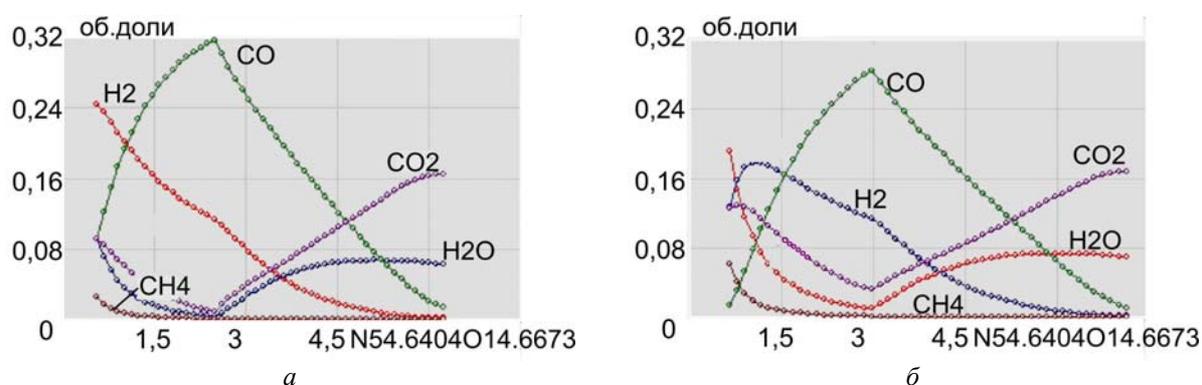


Рис. 1 – Об'ємні частки компонентів процесів повітряної газифікації вугілля:  
а – варіант 1; б – варіант 2

При повітряній газифікації вугілля в температурному інтервалі 800–2000 К газова фаза в основному складається з молекулярного азоту ( $N_2$ ) і синтез-газу ( $CO+H_2$ ).

В процесах повітряної газифікації вугля варіанта 1 при температурі  $T = 1100$  К значення об'ємної концентрації монооксида вуглецю ( $CO$ ) досягає максимуму і становить 31,5 %. При цій же температурі об'ємна концентрація водороду ( $H_2$ ) становить 11,5 %. Дані значення об'ємних концентрацій і температури процесу відповідають значенню коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha = 0,4$ .

Максимальне значення об'ємної концентрації водороду при повітряній газифікації вугля варіанта 1 досягається при  $T = 900$  К і становить 24,5 %. Данна температура відповідає значенню коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha = 0,1$ . При цій же температурі спостерігається максимум значення об'ємної концентрації метану ( $CH_4$ ) – 2,6 %. При збільшенні значень коефіцієнта надлишку повітря з 0,1 до 0,4 величини об'ємної концентрації метану зменшуються до нуля.

Значення об'ємних концентрацій діоксида вуглецю ( $CO_2$ ) і водяного пару ( $H_2O$ ) в інтервалі температур 800–1100 К зменшуються і досягають мінімуму при коефіцієнті надлишку повітря  $\alpha = 0,4$ . Далі збільшення коефіцієнта надлишку повітря веде до зростання об'ємних концентрацій продуктів повного спалення і зменшенню кількості горючих компонентів синтез-газу.

В процесах повітряної газифікації вугля варіанта 2 значення об'ємної концентрації  $CO$  досягає максимуму і становить 27,8 % при коефіцієнті надлишку повітря  $\alpha = 0,4$ . Максимальний вихід водороду спостерігається при коефіцієнті

избытка воздуха  $\alpha = 0,2$ . Смещение максимума значений объемной концентрации водорода объясняется значительной влажностью угля варианта 2 по сравнению с углем варианта 1 и необходимостью затраты большего количества теплоты на сушку.

Кривые объемных концентраций компонентов  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , полученные при расчетах процессов газификации угля варианта 2 подобны кривым для угля варианта 1.

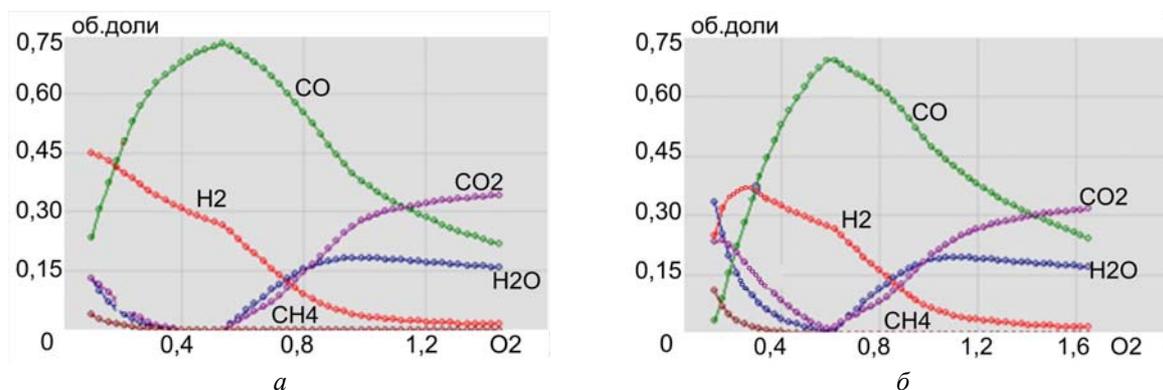


Рис. 2 – Объемные доли компонентов процессов кислородной газификации углей:  
 а – вариант 1; б – вариант 2

С увеличением концентрации кислорода в реагирующем газе уменьшается содержание балласта (азота), увеличивается температура и растет скорость реакции. Скорость реакции при этом возрастает не только пропорционально концентрации реагирующего газа, но и за счет роста эффективной константы скорости. При этом повышение концентрации кислорода в газогенераторах не только интенсифицирует процесс газификации, но и улучшает качество газа.

В процессах кислородной газификации при значении коэффициента избытка окислителя  $\alpha = 0,4$  значения объемных концентраций  $\text{CO}$  для улей вариантов 1 и 2 достигают максимума и составляют 72,3 и 69,1 % соответственно. Данные величины соответствуют значениям температуры процессов газификации углей вариантов 1 и 2 – 1600 К и 1200 К соответственно. Более высокая температура процесса газификации угля варианта 1 объясняется небольшими значениями его влажности ( $W = 5\%$ ) по сравнению с углем варианта 2 ( $W = 18\%$ ).

Для угля варианта 1 значение максимума объемной концентрации водорода  $\text{H}_2$  достигается при значении коэффициента избытка окислителя  $\alpha = 0,1$  и составляет 45,3 %. Данные значения соответствуют температуре процесса газификации  $T = 900$  К. При данной температуре значение объемной концентрации метана  $\text{CH}_4$  максимальное и составляет 4,0 %.

В процессе кислородной газификации угля варианта 2 максимальное значение объемной концентрации водорода имеет место при значении коэффициента избытка окислителя  $\alpha = 0,2$ .

Содержание продуктов полного сгорания ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) уменьшаются в диапазоне значений коэффициента избытка окислителя от 0,1 до 0,4 и возрастают при  $\alpha = 0,4-1,0$ .

В процессах кислородно-паровой газификации объемные концентрации молекулярного водорода достигают максимальных значений при коэффициенте избытка окислителя  $\alpha = 0,4$ . Причем, с увеличением массового отношения водяного пара к окислителю с 20 до 49 %, объемная концентрация  $\text{H}_2$  увеличивается с 31,2 до 38,3 %. В диапазоне изменений коэффициента избытка окислителя  $\alpha = 0,1-0,4$  в синтез-газе в качестве компонента присутствует незначительное количество метана (объемная концентрация  $\text{CH}_4$  (5–7) % для  $\alpha = 0,1$  и около 0,5 % для  $\alpha = 0,4$ ).

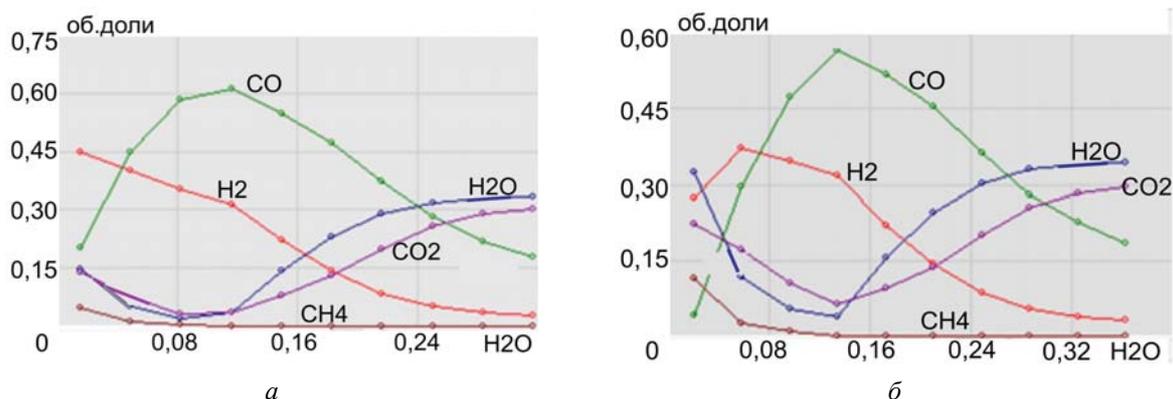


Рис. 3 –Объемные доли компонентов процессов кислородно-паровой газификации углей (массовое соотношение  $H_2O/(H_2O+O_2) = 0,20$ ): а – вариант 1; б – вариант 2

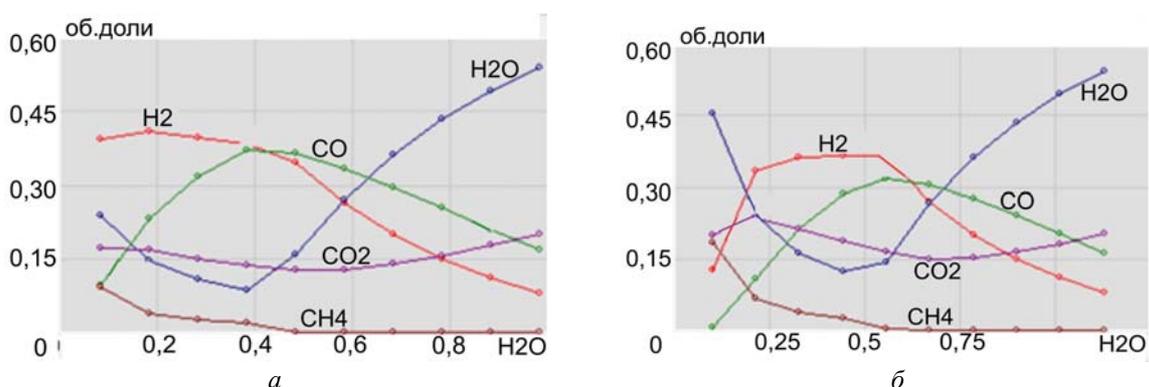


Рис. 4 – Объемные доли компонентов процессов кислородно-паровой газификации углей (массовое соотношение  $H_2O/(H_2O+O_2) = 0,49$ ): а – вариант 1; б – вариант 2

Для кислородно-паровой газификации с массовым отношением водяного пара к окислителю 20 % максимальное содержание оксида углерода имеет место для всех вариантов углей при коэффициентах избытка окислителя около 0,4. С увеличением отношения водяного пара к окислителю с 20 до 49 % значениям максимального выхода оксида углерода для угля варианта 2 соответствует коэффициент избытка окислителя порядка 0,5.

Используя вышеуказанные данные, построены графики зависимости (рис. 5) теоретического КПД газификации от коэффициента избытка окислителя для кислородной и кислородно-паровой газификации.

Для всех способов газификации угля варианта 1 максимальное значение теоретического КПД газификации достигается при коэффициенте избытка окислителя  $\alpha = 0,4$ . При данных условиях получается синтез-газ с максимальной теплотворной способностью. Для угля варианта 2 максимальное значение теоретического КПД газификации имеет место при этом же значении коэффициента избытка окислителя для воздушной, кислородной и кислородно-паровой газификации с отношением  $H_2O/(H_2O+O_2) = 20$  %. При использовании газифицирующих агентов с повышенным содержанием  $H_2O$  наблюдается смещение максимальных значений теоретического КПД газификации в сторону увеличения значения коэффициента избытка окислителя ( $\alpha = 0,5$ ) из-за избытка влажности топлива и необходимости обеспечения процессов частичного горения для поддержания необходимой температуры процесса.

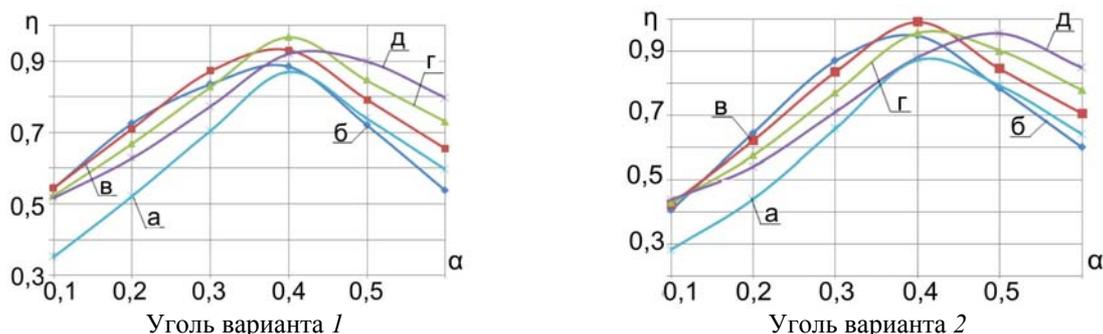


Рис. 5 – Зависимость теоретического КПД газификации от коэффициента избытка окислителя при различных видах газификации: *а* – воздушная; *б* – кислородная; *в* – кислородно-паровая с  $H_2O/(H_2O+O_2) = 20\%$ ; *г* – кислородно-паровая с  $H_2O/(H_2O+O_2) = 36\%$ ; *д* – кислородно-паровая с  $H_2O/(H_2O+O_2) = 49\%$

**Выводы.** Наиболее целесообразными методами обработки рассмотренных углей являются плазменная кислородная и кислородно-паровая газификации, определяющие максимальный выход молекулярного водорода и оксида углерода.

Максимальный выход горючих компонентов синтез-газа при кислородно-паровой газификации имеет место для коэффициентов избытка окислителя 0,4–0,5 и определяется относительным массовым содержанием водяного пара в системе.

**Список литературы:** 1. Шиллинг, Г. Газификация угля [Текст] / Г. Шиллинг, Б. Бонн, У. Краус; пер. с нем. С.Р. Исламова. – М.: Недра, 1986. – 175 с. 2. Калечица, И.В. Химические вещества из угля [Текст] / пер с нем. И.В. Калечица. – М.: Химия, 1980. – 616 с. 3. Karpenko, E.I. Plasma-Fuel Systems for Enhancement Coal Gasification and Combustion [Text] / E.I. Karpenko, V.E. Messerle, A.B. Ustimenko // Presentations Abstracts of 30th International Symposium on Combustion. – University of Illinois at Chicago, July 25–30, 2004. – P. 110. 4. Serbin, S.I. Investigation of the working processes in a gas turbine combustor with steam injection [Text] / S.I. Serbin, A. Mostipanenko, I. Matveev // Proceedings of the ASME/JSME 8th Thermal Engineering Joint Conference. – Honolulu, Hawaii, USA, March 13-17, 2011. – AJTEC2011-44042. – 6 p. 5. Serbin, S.I. Theoretical investigations of the working processes in a plasma coal gasification system [Text] / S.I. Serbin, I. Matveev // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2010. – Vol. 38. – Issue 12. – P. 3300-3305. 6. Трусов, Б.Г. Программная система TERRA для моделирования фазовых и химических равновесий [Текст] / Б.Г. Трусов // Труды XIV Межд. конф. по хим. термодинамике. – 2002. – С. 483.

Поступила в редколлегию 30.01.13

УДК 621.43

**Сравнительный анализ способов газификации углей различного морфологического состава** [Текст] / С.И. Сербин, Н.А. Гончарова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – № 13(987). – С. 89-93. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-774X.

Стаття присвячена чисельним дослідженням процесів газифікації вугілля з газифікуючим агентом різноманітного складу. Для прогнозування характеристик процесів газифікації вугілля різного складу використана модель термодинамічної рівноваги. Знайдені основні параметри і оптимальні умови процесів газифікації вугілля.

**Ключові слова:** газифікація, вугілля, синтез-газ, рівноважний склад, плазма.

The article deals with the theoretical research of the coal gasification processes with different oxidizer composition. The model of thermodynamic equilibrium was used for the prediction of gasification characteristics for different coals. The basic parameters and optimal regimes of coal gasification processes are defined.

**Keywords:** gasification, coal, synthesis gas, equilibrium composition, plasma.