

А.Б. Бирюков /д.т.н./, С.П. Еронько /д.т.н./

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

С.В. Конопля

ПАО «Ясиноватский машиностроительный завод» (Ясиноватая)

ПРИМЕНЕНИЕ ВОДООХЛАЖДАЕМЫХ НЕФУТЕРОВАННЫХ РЕАКТОРОВ ДЛЯ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ ПО СМЕШАННОЙ СХЕМЕ

Предложена концепция слоевого газогенератора для производства генераторного газа из угля по смешанной схеме на базе нефутерованного водоохлаждаемого реактора. Выполнены предварительные расчетные оценки среднего по поверхности реактора коэффициента теплопередачи к кипящей воде; доли теплоты, отводимой к воде, относительно общего потока энергии с произведенным газом. Установлено, что для реакторов с диаметром один метр доля отводимой к воде теплоты будет составлять около 4% от мощности газогенератора. Обосновано, что при полной загрузке газогенератора весь пар, произведенный за счет отвода теплоты к кипящей воде, будет использован для формирования паровоздушного дутья.

Ключевые слова: *каменный уголь, генераторный газ, смешанная схема газификации, водоохлаждаемый реактор.*

Постановка проблемы

Совершенно очевидно, что в условиях Донбасса необходимо расширять использование собственных каменных углей, в том числе и за счет применения технологий газификации угля.

В этой области в мировой практике достигнуты серьезные положительные результаты. Так, в СССР до середины 50-х годов практически все газообразное топливо для металлургии производилось в слоевых газогенераторах. После начала освоения природного газа развитие технологий газификации в СССР в промышленном масштабе остановилось, однако оно продолжалось за рубежом. Лидерами в этой области в настоящее время являются Германия, США, ЮАР [1].

Возможные варианты организации процесса газификации в газогенераторах многообразны как в плане использования различных сред для неполного окисления горючей массы топлива, так и в плане аэродинамических схем взаимодействия топлива и окислителя [2].

В зависимости от состава дутья генераторные газы разделяют на четыре группы [3]:

- воздушный газ (полученный при использовании в качестве дутья только атмосферного воздуха);

- водяной (в качестве дутья используется только водяной пар);

- смешанный (в качестве дутья используется смесь атмосферного воздуха и водяного пара);

- парокислородный (в качестве дутья используется смесь технического кислорода и водяного пара).

Возможные варианты аэродинамического

взаимодействия топлива и окислителя:

- газификация в плотном слое;
- газификация в кипящем слое;
- газификация во взвешенном слое.

В зависимости от давления процесса различают газификацию при давлениях близких к атмосферному и газификацию под высоким избыточным давлением.

Анализ последних исследований и публикаций

Преимущества, недостатки и особенности всех возможных вариантов газификации детально рассмотрены в литературных источниках [1,2]. Так, наибольшая интенсивность переработки достигается при использовании кипящего и взвешенного слоя, наиболее высокие теплоты сгорания газа будут получены при применении парокислородного дутья. Однако наиболее простые технические решения соответствуют слоевой газификации угля при использовании смешанного дутья.

Анализ технических и технико-экономических аспектов проектирования, будущего испытания, доводки и промышленной эксплуатации газогенераторов в условиях малой энергетики Донбасса показал, что на ближайшую перспективу имеет смысл сконцентрировать усилия на разработке газогенераторов плотного слоя, использующих смешанное (паровоздушное) дутье, поскольку для этого потребуются сравнительно более простые конструктивные и технологические решения и можно ожидать более быстрое получение положительных результатов. В мето-

дическом плане расчетная база для расчета газификации по такой схеме проработана в работах [2,4]. Возможные варианты производства пара для формирования смешанного дутья рассмотрены в работе [5].

Технологическая сторона газификации угля по смешанной схеме представлена в работах [6,7]. При проектировании нового оборудования ставится задача создания технологичных, ремонтнопригодных реакторов с как можно более выгодными массогабаритными показателями. Известно, что в ряде случаев в иностранной практике используются нефутерованные водоохлаждаемые реакторы [1]. Однако получить из литературных источников информацию о том, в каких случаях применение таких реакторов возможно и каковы показатели их эксплуатации, затруднительно.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является предварительный анализ возможности и целесообразности применения водоохлаждаемых нефутерованных реакторов для газификации угля по смешанной схеме.

Основной материал исследования

Для рассмотрения выбрана концепция слоевого газификатора угля, способного перерабатывать угли любой марки, разработанная коллективом авторов Донецкого национального технического университета и согласованная со специалистами Ясиноватского машиностроительного завода.

Процесс газификации угля протекает в реакторе, образованном цилиндрической стальной нефутерованной обечайкой 1 (см. рис. 1), к которой в нижней части приварена конусная часть. Для отвода избыточного тепла от реактора он окружен рубашкой охлаждения 2, в которой с низкой интенсивностью протекает кипение воды. Снаружи обечайка рубашки охлаждения окружена слоем теплоизоляции 3. Для формирования окислительной смеси используются вентилятор 4 и эжектор 5. Вентилятор подает заданное количество воздуха на эжектор, в котором происходит подсасывание воздухом необходимого количества водяного пара из парового пространства рубашки и их смешение в смесителе и диффузоре эжектора. Избытки пара отводятся через один из выходов трехходового крана 6. Сформированная окислительная смесь подается на дутьевой коллектор 7, из которого через сопла 8 распределяется в нижний конус реактора. При этом окислительная смесь нагревается, отбирая избыточное тепло от золы перед ее удалением из ус-

тановки. Газифицируемый уголь сначала попадает в промежуточный бункер 9, а оттуда вводится в реакционное пространство при помощи загрузочного шнека 10, который наряду с дозированием угля выполняет функцию уплотнения установки. Во избежание спекания угля в зоне полукоксования в слой материала погружена мешалка 11, которая непрерывно вращается с небольшой частотой. На рис. 1 мешалка показана условно, так как уточнение ее конструкции можно будет провести только по результатам опытно-промышленных испытаний. Выгрузка золя из нижней конусной части реактора производится при помощи вращающейся улитки 12 и шнека 13. При этом шнек выполняет функции измельчения золы и уплотнения установки. Готовый генераторный газ покидает установку через патрубок 14 и отправляется на блок очистки. Образующийся в рубашке охлаждения шлам сливается через спускной кран 15.

Необходимо сделать предварительные оценки количества производимого пара и долю теплового потока, отводимого через стенки реактора, от количества энергии, отдаваемой с произведенным газом.

Количество теплоты, передаваемой в стационарном режиме из реакционного пространства к кипящей воде, определяется при помощи уравнения теплопередачи:

$$Q = k_{cp} F \Delta t_{cp}, \quad (1)$$

где k_{cp} – среднее значение коэффициента теплопередачи по наружной поверхности реактора, Вт/(м²·К); F – площадь поверхности реактора, граничащей с рубашкой охлаждения, м²; Δt_{cp} – средний по наружной поверхности реактора температурный перепад между реакционным пространством и охлаждающей средой, °С.

Площадь поверхности реактора определяется в зависимости от его диаметра D_{cp} и высоты H :

$$F = \pi D_{cp} H.$$

При этом D_{cp} определяется как:

$$D_{cp} = D_{вн} + 0,5\delta,$$

где $D_{вн}$ – внутренний диаметр реактора, м; δ – толщина обечайки реактора, м.

Для технологии слоевой газификации при давлениях, близких к атмосферному, рациональное значение высоты H составляет 1-1,2 м.

Определение среднего значения коэффициента теплопередачи расчетным способом пред-

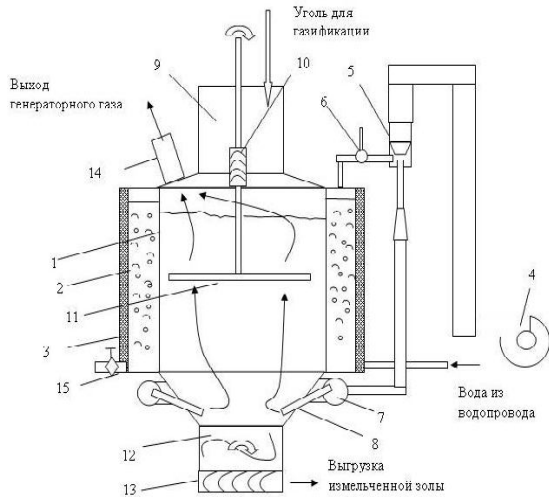


Рис. 1. Предварительная компоновка опытно-промышленной установки газификации угля:
 1 – обечайка реактора; 2 – рубашка охлаждения; 3 – слой наружной теплоизоляции; 4 – дутьевой вентилятор; 5 – эжектор; 6 – трехходовой кран для спуска избытков пара; 7 – дутьевой коллектор; 8 – сопла для ввода окислителя; 9 – промежуточный бункер угля; 10 – загрузочный шнек; 11 – мешалка; 12 – разгрузочная улитка; 13 – разгрузочный шнек; 14 – патрубок для выхода генераторного газа; 15 – кран для слива шлама

ставляет собой сложную задачу, так как апробированных расчетных методик, описывающих теплообмен через наружные стенки нефутерованного реактора при медленном сходе твердой шихты, в открытом доступе нет.

В данной работе приближенные оценки значения этой величины выполнены исходя из следующих соображений:

– на пути отвода теплоты из реакционного пространства имеются следующие термические сопротивления: сопротивление отдаче теплоты к внутренней поверхности реактора, сопротивление теплопроводности стенки реактора, сопротивление конвективной отдаче теплоты к кипящей воде. Основным (и на несколько порядков большим других) термическим сопротивлением отводу теплоты из реакционного пространства к кипящей воде является сопротивление отдаче теплоты к внутренней поверхности реактора. Согласно известному в теплотехнике принципу в этом случае коэффициент теплопередачи может быть принят равным коэффициенту теплоотдачи к внутренней поверхности реактора $k_{cp} = \alpha_{вн}$;

– часть внутренней поверхности реактора непосредственно контактирует с кусками угля, а часть – через газовую прослойку. Эти процессы характеризуются соответствующими условными коэффициентами теплоотдачи α_k и α_2 ;

– в первом приближении доли внутренней поверхности, воспринимающие теплоту по различным механизмам, принимаем по 0,5.

Тогда среднее значение коэффициента теплопередачи по наружной поверхности реактора определяется как:

$$k_{cp} = \alpha_{вн} = 0,5\alpha_k + 0,5\alpha_2 \quad (2)$$

Рассматривается фракция угля 6-40 мм. Средний размер куска δ_{cp} принят 23 мм. Условный коэффициент теплоотдачи для контактного механизма определяется как:

$$\alpha_k = \frac{\lambda_y}{\delta_{cp}} \quad (3)$$

где λ_y – коэффициент теплопроводности материала угля (принят равным 1), Вт/(м·К).

Тогда

$$\alpha_k = \frac{\lambda}{\delta_{cp}} = \frac{1}{0,023} = 43,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Условный коэффициент теплоотдачи для механизма передачи теплоты через зазор определяется как:

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_2}{\delta_3} \quad (4)$$

где λ_2 – коэффициент теплопроводности газовой прослойки, Вт/(м·К); δ_3 – среднее значение толщины газового зазора между кусками угля и внутренней поверхностью обечайки реактора, м.

Принимая с учетом среднего состава газовой среды в полости реактора и геометрии кусков угля значения $\lambda_2 = 0,0622$ Вт/(м·К) и $\delta_3 = 0,002$ м, получим $\alpha_2 = 31,1$ Вт/(м²·К).

Тогда

$$k_{cp} = \alpha_{вн} = 0,5\alpha_k + 0,5\alpha_2 = 0,5 \cdot 43,4 + 0,5 \cdot 31,1 = 37,25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Средний по наружной поверхности реактора температурный перепад между реакционным пространством и охлаждающей средой определен исходя из значения температуры воды, кипящей в рубашке охлаждения, 100 °С и температурного распределения по зонам газификации, контактирующим с рубашкой охлаждения (рис. 2):

– окислительная зона (II) 1000-1300 °С;

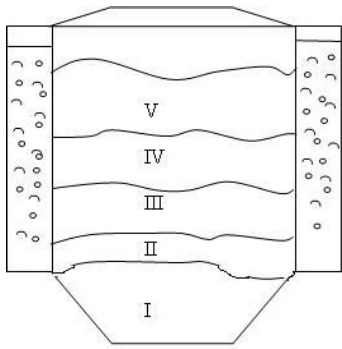


Рис. 2. Местоположение характерных зон протекания процесса газификации каменного угля: I – зона золы; II – окислительная зона; III – восстановительная зона; IV – зона полукоксования; V – зона подсушки топлива

- восстановительная зона (III) 700-1200 °С;
- зона полукоксования (IV) 300-700 °С;
- зона сушки (V) 100-300 °С.

Для расчетной оценки принято линейное изменение температуры по зонам II-IV от 1200 °С в окислительной зоне реактора до 100 °С на поверхности угля в зоне подсушивания. Таким образом, среднее значение температурного перепада определено как: $(1200+100)/2-100=550$ °С.

Для того чтобы уменьшить негативное влияние захлаживания объема реактора через рубашку охлаждения, внутренний диаметр реактора рекомендовано выбрать порядка одного метра. Таким образом, принимая для предварительных оценок значения геометрических параметров реактора газификации $H=1$ м, $D_{cp}=1$ м, при помощи зависимостей (1)-(4) получим значение теплового потока к кипящей воде $Q=64$ кВт.

Для слоевого реактора с небольшим поперечным сечением показатель достигаемой производительности по углю составляет порядка 500 кг с 1 м² полезной площади реактора в поперечном сечении в час. Даже в случае переработки высокозольного угля ($A^p=30-35$ %) и при достаточно низком удельном выходе смешанного генераторного газа (например, 2,5 м³ газа с теплотой сгорания 5,5 МДж/м³ с одного килограмма угля) мощность газогенератора с химической энергией производимого газа составит 1,5 МВт. Таким образом, доля теплоты, отводимой к кипящей воде, при полной загрузке газификатора составит 4,3 % от мощности по производимой энергии газа. Естественно, при снижении производительности газификатора доля энергии, отводимой к кипящей воде, будет возрастать.

При восприятии кипящей водой мощности 64 кВт будет образовываться 0,026 кг пара в секунду. При этом при полной загрузке газификатора удельный выход пара на один килограмм газифицируемого угля будет составлять 0,24 кг.

Таким образом, при полной загрузке газификатора весь произведенный пар будет использован для формирования смешанного паровоздушного дутья (типичный диапазон удельного расхода пара составляет 0,2-0,5 кг пара/кг угля).

Выводы

1. Предложена концепция слоевого газификатора угля, способного перерабатывать угли любой марки, разработанная коллективом авторов Донецкого национального технического университета и согласованная со специалистами Ясиноватского машиностроительного завода, использующая нефутерованный водоохлаждаемый реактор.

2. Предварительные расчетные оценки показывают, что при использовании для слоевой газификации угля по смешанной схеме водоохлаждаемых нефутерованных реакторов ожидаемое значение коэффициента теплопередачи к кипящей воде составляет порядка 40 Вт/(м²·К).

3. Для реакторов с диаметром один метр прогнозируется, что доля теплоты, отводимой к кипящей воде, будет составлять около 4% от мощности газогенератора по производимой химической энергии генераторного газа.

4. При полной загрузке газогенератора весь пар, произведенный за счет отвода теплоты к кипящей воде, будет использован для формирования паровоздушного дутья.

Список литературы

1. Шиллинг Г.-Д. Газификация угля / Г.-Д. Шиллинг, Б. Бонн, У. Краус. – М.: Недра, 1968. – 175 с.
2. Основы практической теории горения: учебное пособие для вузов / В.В. Померанцев [и др.]. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1986. – 312 с.
3. Бирюков А.Б. Сжигание и термическая переработка органических топлив / А.Б. Бирюков, И.П. Дробышевская, Ю.В. Рубан. – Донецк: Изд-во «Ноулидж» (Донецкое отделение), 2014. – 232 с.
4. Бирюков А.Б. Методика расчета и исследование процесса газификации твердого топлива по смешанной схеме // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2014. – №3. – С. 115-119.
5. Сафьянц С.М. Разработка и анализ способов получения пара для формирования паровоздушного дутья в системах производства смешанного генераторного газа / С.М. Сафьянц, А.Б. Бирюков, А.С. Сафьянц // *Металлургическая теплотехника: сб. науч. тр.* – Днепропетровск: Новая идеология, 2014. –

- Вып.6(21). – С. 58-65.
6. Yoshikawa K. High-Temperature Gasification of Solid Fuels / SAE Technical Paper. – 1999. – №1. – P. 1-7.
7. A parametric study on coal gasification for the production of syngas / A. Gungor [et al.] // Chemical Papers. – 2012. – Vol.66. – P. 677-683.

A.B. Biryukov /Dr. Sci. (Eng.), S.P. Eron'ko /Dr. Sci. (Eng.)/
 Donetsk National Technical University (Donetsk)

S.V. Konoplya
 Yasinovatskiy Machine Building Plant (Yasinovataya)

**APPLICATION OF WATER-COOLED UNLINED REACTORS
 FOR THE GASIFICATION OF COAL ACCORDING TO A MIXED SCHEME**

Background. When designing new gas generators, the task is to create technological and maintainable reactors. In large measure, this problem is solved through the use of unlined water-cooled reactors, which in some cases are used in foreign practice. Since there is no detailed information on the features and operation of such reactors in the literature, the aim of this paper is a preliminary analysis of the possibility and feasibility of using water-cooled unlined reactors for coal gasification according to a mixed scheme. In this case, the purpose was in creating a workable and maintainable gas generator of the power to 2 MW with the best possible dimensions and weight, which is able to process coal of any grade and designed to meet the needs of small power engineering.

Materials and/or methods. To perform preliminary estimates of the heat transfer to boiling water coefficient average on the surface of the reactor and the amount of the exhaust heat the assumption was made that the heat transfer coefficient can be equal to the coefficient of heat transfer to the inner surface of the reactor $\bar{k} = \alpha_{\text{вн}}$; some part of the inner surface of the reactor directly contacts with coal pieces, another part – through the gas layer, these processes are characterized by the corresponding conventional coefficients of heat transfer $\alpha_{\text{к}}$ and $\alpha_{\text{с}}$, and share of internal surface that receives heat by different mechanisms taken 0.5. Standard dependencies for stationary heat transfer from one medium to another through a separation wall used for calculations.

Results. The results showed that when using water-cooled unlined reactors for coal gasification according to a mixed scheme the expected value of the coefficient of heat transfer to boiling water is about 40 W/(m²·K). It is shown that for reactors with a diameter of one meter, the proportion of exhaust to water heat is about 4 % of the gas generator power. Considering the thermal power of the gas generator and discharge coefficients on air and steam for the formation of the blast, this amount of heat corresponds to the amount of energy needed to obtain the given quantity of steam.

Conclusion. Thus, by calculations, it is proved that at full load of the gas generator the steam produced due to heat exhaust to the boiling water will be used for the formation of a steam blast, which is a serious argument in favor of creating unlined water-cooled reactors for gasification of coal according to a mixed scheme.

Keywords: coal, generator gas, a mixed scheme of gasification, water-cooled reactor.

Сведения об авторах

А.Б. Бирюков

SPIN-код: 3186-0680
 Orcid ID: 0000-0002-8146-2017
 AuthorID: 811777
 Телефон: +380 (50) 260-97-75
 Эл. почта: birukov.ttf@gmail.com

С.В. Конопля

Телефон: +380 (50) 478-78-66
 Эл. почта: slen2012@mail.ru

С.П. Еронько

SPIN-код: 5911-0900
 Orcid ID: 0000-0002-5806-4723
 Телефон: +380 (50) 472-27-49
 Эл. почта: ersp@meta.ua

Статья поступила 24.07.2016 г.

© А.Б. Бирюков, С.П. Еронько, С.В. Конопля, 2016
 Рецензент д.х.н., проф. Л.Ф. Бутузова