

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА ИЗ НИЗКОСОРТНОГО УГЛЯ В ПГУ

М.В. Савина, С.С. Тимофеева

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань

pmv_83@mail.ru, zvezdochka198512@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть возможность получения генераторного газа из низкосортного угля на основе технологии газификации. Исследовать основные способы газификации угля, рассмотреть основные преимущества и недостатки. Представить основные этапы разработки схемы использования генераторного газа в парогазовых установках (ПГУ). На основании литературного обзора и результатов расчета процесса газификации Березовского угля, разработать алгоритм выбора технологической схемы производства тепловой и электрической энергии с газификацией угля, сформулировать основные критерии оценки таких схем. **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** При исследовании состава генераторного газа из угля использовались методы расчета концентраций продуктов химических реакций с учетом констант равновесия. При разработке схемы использования генераторного газа из низкосортного угля в ПГУ применялись основные принципы формирования технологических схем. При разработке критериев оценки использовались основы теплового расчета и технико-экономические методы оценки технологических схем. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье был проведен обзор современных технологий переработки традиционного и искусственного (альтернативного) топлива с выработкой электроэнергии, а также расчет процесса газификации Березовского угля. Была разработана схема использования генераторного газа из низкосортного угля в ПГУ. **ОБСУЖДЕНИЕ.** При использовании в качестве основного топлива низкосортного бурого угля была выбрана схема, в которой измельченный в молотковой мельнице уголь проходит стадию сушки воздухом, а затем подается в поточный газогенератор с парокислородным дутьем. Газификация пыли Березовского бурого угля в поточном газогенераторе позволяет получить газ с теплотой сгорания $12,5 \text{ МДж/м}^3$, который может использоваться в качестве топлива для энергетических установок. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** С целью снижения расходов на эксплуатацию оборудования, экономии ценного сырья для химической промышленности и снижения вреда экологии, был предложен алгоритм разработки технологической схемы ПГУ, использующей внутрицикловую газификацию. Критериями оценки эффективности технологии ПГУ на генераторном газе из низкосортного топлива являются расходы, термодинамические параметры, теплотехнические свойства исходного топлива, окислителя генераторного газа. Для энергетической установки такими параметрами является мощность, КПД, расходы топлива и воздуха. Критерием для сравнения технологических схем на природном газе и газе, полученном из угля, выступает себестоимость полученной энергии, срок окупаемости, капитальные и эксплуатационные затраты.

Ключевые слова: *газификация; низкосортное топливо; газотурбинная установка; поточный газогенератор; технологическая схема; автономное энергоснабжение.*

DEVELOPMENT OF A SCHEME FOR THE USE OF GENERATOR GAS FROM LOW-GRADE COAL IN THE CCGP

MV. Savina, SS. Timofeeva

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

pmv_83@mail.ru, zvezdochka198512@mail.ru

Abstract. *THE PURPOSE.* Consider the possibility of obtaining generator gas from low-grade coal on the basis of gasification technology. To study the main methods of coal gasification, to consider the main advantages and disadvantages. To present the main stages of developing a scheme of using generator gas in combined-cycle plants (CCPP). On the basis of a literature review and the results of calculating the process of gasification of Berezovsky coal to develop an

algorithm for selecting the technological scheme of heat and electricity generation with coal gasification, to formulate the main criteria for evaluating such schemes. **MATERIALS AND METHODS.** In studying the composition of the generator gas from coal, methods for calculating the concentrations of chemical reactions products were used, taking into account the equilibrium constants. When developing a scheme of using the generator gas from low-grade coal in the CCPP, the basic principles of formation of technological schemes were used. In developing the evaluation criteria were used the basics of thermal calculation and technical and economic methods of evaluation of technological schemes. **RESULTS.** In the article a review of modern technologies of processing traditional and artificial (alternative) fuel with the production of electricity was conducted, as well as the calculation of the process of gasification of Berezovsky coal. A scheme of using the generator gas from low-grade coal in the CCU was developed. **DISCUSSION.** When using low-grade lignite as the main fuel, a scheme was selected in which the coal crushed in a hammer mill goes through the air drying stage and then is fed to the in-line gas generator with steam-oxygen blowing. Gasification of pulverized Berezovsky lignite in an in-line gas generator makes it possible to obtain gas with calorific value 12.5 MJ/m³ which can be used as fuel for power units. **CONCLUSIONS.** In order to reduce the operating costs of equipment, save valuable raw materials for the chemical industry and reduce harm to the environment, an algorithm for developing a technological scheme of CCPP, using intra-cycle gasification, was proposed. The criteria for assessing the efficiency of CCPP technology on the generator gas from low-grade fuel are costs, thermodynamic parameters, thermal properties of the original fuel, the oxidizer of the generator gas. For power plant such parameters are power, efficiency, fuel and air consumption. The criterion for comparison of technological schemes on natural gas and gas, received from coal, is the cost price of the received energy, payback period, capital and operational costs.

Keywords: gasification; low-grade fuel; gas turbine unit; inline gas generator; process flow diagram; autonomous power supply.

Введение

Будущее газовых турбин, как производства турбин, во всем мире за последнее время менялось таким образом, что 14,9 миллиарда долларов из общей стоимости производства в 21,9 миллиарда долларов (2004 год) пришлось на авиационные газовые турбины и 7,1 миллиарда долларов - на неавиационные газовые турбины.

Крупные электростанции, использующие такие технологии, как системы сжигания в псевдооживленном слое в атмосфере, усовершенствованные системы сжигания в псевдооживленном слое под давлением, интегрированные системы газификации с комбинированным циклом, а также интегрированные системы с комбинированным циклом с газификацией (IGCC) и топливными элементами и небольшие электрические микротурбинные генераторные установки составят новое поколение применений газовых турбин. Хотя многие из этих методов реализованы для облегчения использования твердого топлива (угля, древесных отходов, жмыха сахарного тростника) и повышения мощности и эффективности, являются новыми, другие – нет [1, 2].

Создание газотурбинной установки на твердом топливе может основываться на двух основных технологиях: прямого сжигания твердого топлива в камере сгорания и газификации угля. В зависимости от используемой технологии получения рабочего тела для газовой турбины тепловая схема ГТУ может меняться принципиальным образом [3].

Электростанции с комбинированным циклом с газификацией (IGCC) ориентированы на менее интегрированные конфигурации, поскольку их легче запускать, менее сложно эксплуатировать и с небольшими модификациями можно использовать газовые турбины и ПГУ, предназначенные для природного газа (рис. 1). Неотъемлемые аспекты химической обработки IGCC делают их идеальными установками для полигенерации.

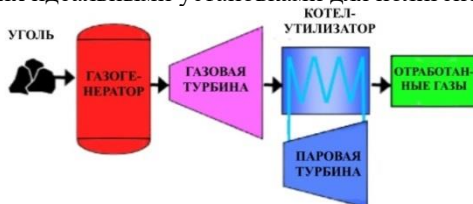


Рис. 1. Схема электростанции с комбинированным циклом с газификацией

Fig. 1. Diagram of a combined cycle power plant with gasification

Целью настоящей работы является возможность включения системы подготовки угля на основе газификации в технологический цикл ПГУ и разработка основных принципов разработки таких схем.

Литературный обзор

В перспективе, низкосортное топливо может стать основным видом органического твердого топлива, поскольку его запасы велики [4-6]. В России уголь добывается в двух крупнейших угольных бассейнах - Кузнецком и Канско-Ачинском, запасы угля последнего из которых характеризуются высокой зольностью, сернистостью и влажностью. Важными проблемами при использовании такого угля являются образование большого количества вредных газообразных выбросов и твердых отходов, а также необходимость предварительной подготовки топлива на основе стадий сушки, измельчения. Повышение эффективности использования низкосортного угля возможно на основе внедрения многоцелевых и безотходных технологий, одной из которых является газификация [7]. Газификация угля актуальна для объектов теплоэнергетики малой и средней мощности, а ее применение позволяет получить горючий газ и на его основе тепловую и электрическую энергию [8].

Газификация обеспечивает гибкость топлива для использования всех этих видов топлива, а полиграфические установки с газификаторами могут преобразовывать различные виды топлива в несколько продуктов. Мировые темпы установки газификационных установок увеличились с 2000 года. Около трех четвертей (71%) этих газификаторов используются для производства химикатов и газообразного топлива, и большая часть этого производства приходится на Азию. Примерно 29% газификаторов используется для производства электроэнергии, и почти все это находится в Северной Америке и Европе.

Например, *Siemens* использует концепцию газификации топлива, которая предлагает два основных решения для широкого спектра сырья: в газификаторе, который питается золообразующими углями (с содержанием золы более 3%), применяется охлаждающий экран, который обеспечивает периоды короткого запуска и отключения и максимальную доступность компонентов. За счет сухой подачи может быть достигнута высокая эффективность и степень конверсии углерода выше 98%. Для низкосольного сырья, такого как нефтяной кокс или гудроны и масла, была разработана конструкция газогенератора с огнеупорной футеровкой, что включает в себя систему подачи для жидкостей [9].

По прогнозам экспертного сообщества, на фоне истощения ресурсов дешевой нефти и подорожания стоимости природного газа, в мировом балансе энергоресурсов ожидается увеличение доли потребления твердого топлива. В то же время экологические требования к источникам энергии за последнее десятилетие значительно ужесточились. Данные обстоятельства стимулируют проведение исследований и разработки инновационных технологий в области использования твердого топлива, в первую очередь низкосортных видов, запасы которых значительны. Комплексная переработка твердого топлива создает возможности выработки энергии, а также получение различных видов товарной продукции.

Одним из примеров может служить комплексное энерготехнологическое использование твердого топлива путем включения в тепловой цикл процесса пирогазификации твердого топлива. В такой схеме происходит многоступенчатое сжигание высокосернистых зольных топлив с использованием процессов пиролиза и газификации и дальнейшая очистка генераторного газа, что позволяет повысить коэффициент использования потенциальной энергии топлива, и генерировать электроэнергию без вредных выбросов в окружающую среду [10].

В настоящее время существуют различные способы промышленной газификации углей, наиболее распространенными из которых являются следующие: в стационарном слое – по методу *Lurgi*, в кипящем слое – по методу *Winkler*, в потоке – по методу *Koppers-Totzek* [11-13]. Особенности конструкции газогенераторов обусловлены различными подходами к подготовке сырья и его ввода в аппарат, а также режимными параметрами самого процесса. Существуют также новые методы газификации: процесс в шлаковом расплаве, каталитическая газификация, гидрогазификация, газификация в циклонных и многоступенчатых газогенераторах.

Одним из перспективных методов получения газа из угля является процесс газификации пылевидного топлива в потоке [14]. Основными преимуществами этого метода является высокая интенсивность процесса. При работе ГТУ на искусственном газе, полученного при газификации, основной проблемой является его более низкая теплота сгорания по сравнению с природным газом. Применение в качестве состава окислителя кислорода позволяет получить газ с высокой теплотворной способностью. Помимо этого, газификация в поточных аппаратах имеет важное значение для применения низкосортных,

влажных и зольных топлив, которые содержит много мелочи, и сжигание таких топлив затруднено в слоевых аппаратах.

Повышенное давление и высокие значения температуры в поточных газогенераторах обеспечивают высокую производительность процесса, а при использовании полученного газа в ГТУ снижаются затраты на его компримирование [15]. Одним из недостатков поточной газификации является необходимость системы предварительной подготовки топлива и кислорода. Однако, поточный газогенератор может быть легко включен в технологическую схему с уже имеющейся системой топливоподачи и топливоприготовления [16].

В настоящее время борьбу за лидерство ПГУ с внутрицикловой газификацией ведут *General Electric, Siemens, Mitsubishi*. Отмечается, что мировой практике создание энергоблоков с внутрицикловой газификацией примерно на 20–25% дороже, чем пылеугольных энергоблоков на суперкритических параметрах. В России пока не создано ни одной промышленной энергетической установки с газификацией угля полного цикла, однако ведутся исследования на этапе опытно-промышленных испытаний, создания экспериментальных образцов и моделирования процесса газификации (табл. 1).

Таблица 1

Научные разработки в области газификации угля [9]

| Организация | Технология | Область применения | Температура и давление | Стадия разработки |
|--|---|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург | Газификация пылевидного угля в потоке окислителя (воздух) | ПГУ-ВЦГ | T=1600-1700 °C, P=3-10 МПа | Экспериментальный образец |
| ВТИ, г. Москва | Газификация в слое | ПГУ-ВЦГ | T=1650-1800 °C, P=0,6-2,5 МПа | Опытный образец |
| ЦКТИ, г. Санкт-Петербург | Газификация пылевидного угля в потоке окислителя | ПГУ-ВЦГ | T=1300 °C, P=0,1-0,6 МПа | Опытный образец |
| Институт теплофизики СО РАН ТОО «НТО Плазмотехника | Плазменная газификация | ПГУ-ВЦГ | T=2827 °C, P=атмосферное | Экспериментальный стенд |
| Институт теплофизики им.С.С. Кутателадзе ИТ СО РАН, г. Новосибирск | Воздушная и паровоздушная газификация | Предвключенная газификация | T=550-1100 °C, P=атмосферное | Экспериментальный стенд |
| ЮРГПУ (НПИ) г.Новочеркасск | Газификация пылевидного низкорреакционного угля | Химическая промышленность | T=1000 °C, P=3МПа | Экспериментальный стенд |
| ЗАО «КОМПОМА ШТЭК», г. Москва | Прямоточно-вихревая газификация водоугольных суспензий | Химическая промышленность | T=1700 °C, P=4МПа | Экспериментально-промышленный образец |

Исследования, проведенные авторами [17], по получению генераторного газа методом паровоздушной газификации в неподвижном слое показали, что влага, составляющие вместе с золой балласт топлива, переходит в газ, понижая его ценность. При повышении содержания влаги и золы в угле качество газа ухудшается. Однако отмечают, что бурый уголь также может быть использован наравне с каменным для получения генераторного газа.

Для повышения КПД и производительности процесса газификации для исключения его взрывоопасности могут быть использованы такие технологические приемы, как ступенчатая сушка измельченного топлива (бурого угля влажностью 20-53%) путем забора части генераторного газа из газогенераторной установки при отсутствии в нем кислорода, его

дальнейшее смешение с водой (получение водоугольной суспензии) и повторное измельчение полученной суспензии с дальнейшей газификацией [18].

Также возможно использование таких методов как газификация парокислородным дутьем с предварительной активацией воздуха нанокатализаторами и подачей в газификатор пылевидного топлива по схеме противотока относительно восходящего струйно-вихревого потока окислителя. Поток окислителя с водяным паром при этом закручивают с помощью лопастного аппарата или создание ПГУ с паровоздушной газификацией твердых топлив в кипящем слое [19-21].

Их основными преимуществами являются:

- высокая экологическая чистота, превышающая существующие и ожидаемые европейские экологические нормы,
- возможность достижения широкого диапазона регулирования нагрузки энергоблоков и обеспечение маневренных режимов работы ПГУ,
- наличие отработанных технологий полной утилизации жидких и твердых отходов,
- экспериментально доказанная возможность полной утилизации CO₂ с меньшими затратами на это, чем при факельном сжигании либо сжигании в разных модификациях котлоагрегатов кипящего слоя.

К недостаткам следует отнести:

- сложность схемы ПГУ, что приводит к существенному уменьшению степени готовности оборудования,
- не решенные до данного момента вопросы долговечности работы высоко температурных фильтров (керамических и зернистых) для очистки газообразных продуктов газификации от пыли и оксидов серы.

Эффективность технологических схем ПГУ с выработкой электроэнергии, включающих процесс газификации, во многом определяется выбором реактора газификации - газификатора. Выбор конкретного его типа зависит от многих обстоятельств, в том числе от характера конечного использования получаемого газа, физических и химических свойств угля, требуемой производительности газификатора и способов утилизации тепла и побочных продуктов. Одной из задач при этом является повышение калорийности генераторного газа, а также совершенствование системы очистки генераторного газа от токсичных веществ. Кроме того, остается актуальной разработка и развитие математических моделей, которые позволят рассчитывать макрокинетику и теплообмен в камере газификации для дальнейшего проектирования газогенераторного оборудования и его успешного внедрения в промышленных масштабах [22].

Технико-экономическая оценка внедрения технологий ПГУ с газификацией при различном дутье, проведенная авторами [23], показывает, что ПГУ с парокислородной газификацией угля в потоке уступает по КПД энергоблока ПГУ на природном газе всего на 12,5% (46,5% и 58% соответственно), несмотря на значительные удельные капитальные затраты. Данные затраты могут быть значительно уменьшены при грамотном подборе условий работы реактора-газификатора и предварительной обработке твердого топлива.

Главные вредные вещества, содержащиеся в генераторном газе – это соединения серы, основным и самым опасным из которых является сероводород (H₂S), вызывающий коррозию оборудования. При его сжигании образуется диоксид серы (SO₂), загрязняющий атмосферу. Уменьшение данных выбросов возможно с помощью природного хемосорбента, предложенного автором [24].

Материалы и методы исследования

Рассмотрим процесс подготовки угля на основе газификации угля в потоке на парокислородном дутье. В качестве исходного топлива применяется бурый уголь Березовский Б2, класс Р, характеристики которого представлены в таблице 2.

Таблица 2

Теплотехнические характеристики угля

| Уголь | Состав на рабочую массу топлива, % | | | | | | | Выход летучих, % | Теплота сгорания, кДж/кг |
|-------------------------|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|------------------------------------|----------------|----------------|------------------|--------------------------|
| | C ^P | H ^P | N ^P | O ^P | (S _к +S _{оп}) | W ^P | A ^P | | |
| Березовский Б2, класс Р | 44,3 | 3 | 0,4 | 14,4 | 0,2 | 33 | 4,7 | 48 | 15671 |

Расчет состава газа проводился для равновесного состояния газа методом Дешалита [25]. Состав генераторного газа определяется путем составления реакций в равновесной их форме:



Определяя константы равновесия реакций (1), (2) и парциальное давление газифицирующей смеси рассчитываются парциальные давления компонентов и общий состав генераторного газа.

Основные этапы разработки технологической схемы с газификацией угля

Выбор метода газификации угля для оценки возможности ее применения в условиях конкретного источника энергоснабжения должен осуществляться на основании результатов термодинамических и технико-экономических расчетов.

Рассмотрим основные этапы разработки технологической схемы с газификацией угля. В первую очередь, необходим анализ существующей технологической схемы энергообеспечения с определением потребности в энергоснабжении и мощности генерирующего оборудования. Анализ схемы включает в себя определение основных характеристик имеющегося основного и резервного оборудования, наличие площадки и инфраструктуры для установки дополнительного оборудования, расстояние источника энергоснабжения до потребителя.

Для выбора топлива учитывается вид используемого и резервного топлива, также учитывается возможность применения местных топлив. Выбор топлива определяется его запасами, транспортной сетью для его доставки, стоимостью по сравнению с природным газом. Учитывается наличие системы пылеприготовления. Основным оборудованием системы топливоприготовления являются углеразмольные мельницы, работа которой должна обеспечивать получение заданной тонкости и влажности. Выбор типа мельницы зависит от свойств используемого топлива и типа системы пылеприготовления.

Молотковые мельницы применяются для размола бурых и каменных углей с невысокой абразивностью и предназначены для использования в системах пылеприготовления практически любого типа.

Мельницы-вентиляторы используются для размола высоковлажных топлив и совмещают размол и перемещение топлива вместе с сушильным агентом.

Шаровые барабанные мельницы являются универсальными и применяются для твердых абразивных топлив и в любых системах пылеприготовления.

В качестве сушильного агента для сушки угля могут быть использованы горячий воздух, смесь воздуха с топочными газами, а также азот, полученный в системе подготовки окислителя в процессе разделения воздуха.

В системе подготовки окислителя главным оборудованием является воздухоразделительная установка, в которой происходит получения кислорода. Вспомогательным оборудованием являются смесители, в которых происходит смешивание кислорода и пара в необходимых пропорциях и теплообменники, предназначенные для подогрева дутья. Выбор воздухоразделительной установки осуществляется в соответствии с требованиями к характеристикам кислорода (давление, агрегатное состояние, состав). В качестве исходных характеристик выступает расход и свойства воздуха, давление, состав и агрегатное состояние других продуктов разделения, мощность и производительность установки.

На основании анализа существующей технологической схемы энергообеспечения промышленного предприятия и выбора твердого топлива с системой его подготовки осуществляется расчет с определением основных характеристик и подбором оборудования, составление материальных и тепловых балансов. Для всей схемы задается мощность и характеристики генерирующего оборудования, температура окружающей среды, для оборудования - расход и характеристики угольной пыли, параметры сушильного агента, расходы и параметры воздуха, водяного пара, характеристики оборудования. Для блока газификации топлива определяются расходы и характеристики угольной пыли, расход и параметры окислителя, температура и давление газификации.

На основании расчета определяются основные параметры получаемого газа, конструкционные характеристики газогенератора, и подбирается оборудование системы пылегазоочистки с последующим его расчетом. Оборудование пылегазоочистки включает в себя циклоны, скрубберы, фильтры, систему сероочистки, также промежуточные газоохладители.

Результаты исследования. Расчет процесса газификации угля

Высокие показатели влажности и выхода летучих веществ березовского бурого угля, представленные в таблице 2, являются негативными для прямого сжигания в энергетических установках. При нагревании из исходного вещества такого угля, начинают

выделяться летучие вещества, содержащие большое количество смолистых веществ, которые затрудняют процесса, и могут привести к выходу из строя газоочистки [26].

В связи с этим применение газификации такого топлива с низкими показателями качества позволит улучшить его топливные характеристики путем получения горючего газа и расширить направления его применения в энергетике.

Процесс газификации угольной пыли происходит в поточном газогенераторе при недостатке кислорода. В качестве окислителя применяется парокислородное дутье. Соотношение пара к кислороду составляет 11,5/88,5. В газогенераторе осуществляется газификация угольной пыли при высокой температуре около 1500°C и повышенном давлении 2 МПа. Размер частиц угольной пыли составляет 500 мкм. Характеристики угольной пыли представлены в таблице 3.

Таблица 3

| Теплотехнические характеристики угольной пыли | | | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------------------------|----------------|----------------|
| Угольная пыль | Состав пыли, % | | | | | | |
| | C _п | H _п | N _п | O _п | (S _к +S _{ор}) | W _п | A _п |
| Уголь Березовский Б2, класс Р | 58,2 | 3,9 | 0,5 | 18,9 | 0,3 | 12 | 7 |

В результате определения констант равновесия реакций и парциальных давлений газифицирующей смеси были рассчитаны парциальные давления компонентов и общий состав генераторного газа. Результаты расчетов состава генераторного газа из Березовского бурого угля представлены в таблице 4.

Таблица 4

| Характеристики генераторного газа | |
|---|----------|
| Параметры | Значение |
| Теплота сгорания генераторного газа (МДж/м ³) | 12,5 |
| Состав генераторного газа (об.%) | |
| CO | 37,53 |
| CO ₂ | 22,1 |
| H ₂ | 14,5 |
| H ₂ O | 8,58 |
| CH ₄ | 17,1 |
| H ₂ S | 0,13 |
| N ₂ | 0,06 |

Материальный баланс процесса газификации приведен в таблице 5.

Таблица 5

| Материальный баланс газификации | | | |
|---|-------|------------------|-------|
| Приход | | Расход | |
| Потоки | кг | Потоки | кг |
| Угольная пыль | 0,64 | Генераторный газ | 2,243 |
| Кислород | 0,09 | Зола-унос | 0,03 |
| Пар | 1,44 | Потеря углерода | 0,004 |
| Газ рециркуляции (5% от расхода генераторного газа) | 0,107 | - | - |
| Итого: | 2,28 | Итого: | 2,28 |

Теплота полученного генераторного газа из угля составила 12,5 МДж/м³, выход генераторного газа – 1,79 м³/кг. Полученные результаты показывают целесообразность применения такого газа для сжигания в камерах сгорания ГТУ после очистки его от вредных примесей и сероводорода.

Разработка схемы использования генераторного газа из низкосортного угля в ПГУ

На основе проведенного обзора современных технологий переработки традиционного (природного газа, бурого угля, торфа) и искусственного (альтернативного) топлива с выработкой электроэнергии, а также результатов расчета процесса газификации Березовского угля, можно предложить следующий алгоритм разработки технологической схемы ПГУ, использующей внутрицикловую газификацию с целью снижения расходов на

эксплуатацию оборудования, экономии ценного сырья для химической промышленности и снижения вреда, наносимого экологии (рис. 1). Основные критерии оценки таких схем представлены в таблице 6.



Рис. 2. Алгоритм выбора технологической схемы производства энергии с газификацией угля

Fig. 2. Algorithm for selecting the technological scheme of energy production with coal gasification

Таблица 6

Критерии оценки схемы с газификацией угля

| Стадия | Этап анализа | Критерий оценки |
|--------------------------------|--|--|
| Выбор топлива | Анализ теплотехнических свойств твердого топлива (каменные и бурые угли, торф) | Состав топлива (влажность, зольность, горючие компоненты) |
| Подготовка топлива | Выбор мельницы для измельчения и типа сушильного реагента | Расход сушильного агента и способ отбора, фракционный состав пыли, теплотехнические свойства пыли |
| Получение генераторного газа | Выбор типа газификации (поточная, кипящий, стационарный слой) и режимных параметров процесса (температура, давление, коэффициент избытка воздуха) | Выход и состав генераторного газа, теплотворная способность, термодинамические параметры газа, расход золы и шлака |
| Подготовка окислителя | Выбор типа дутья, определение оборудования для получения компонентов дутья (разделение воздуха с получением кислорода в воздухоразделительной установке, получение пара в котле-утилизаторе или парогенераторе, смешение компонентов в смесителе или теплообменнике) | Расход кислорода, пара, азота, соотношение пара к кислороду, температура дутья |
| Выработка электроэнергии в ПГУ | Выбор мощности ГТУ и ПТ | Индекс Воббе, электрический КПД, расход и состав дымовых газов |

На основании разработанного алгоритма и критериев оценки можно разработать новую технологическую схему ПГУ с газификацией низкосортного угля как уже функционирующего источника энергоснабжения, так и нового.

В качестве метода анализа энергетической эффективности может использоваться эксергетический метод термодинамического анализа, критерием оценки которого выступает эксергетический КПД для отдельных блоков и всей технологической схемы. На основании полученных результатов оценки эффективности проводится сравнение технологической схемы энергообеспечения промышленного предприятия с газификацией угля с модернизируемой схемой, работающей на газообразном топливе, с существующими тарифами для потребителей и последующим выбором наиболее эффективного метода использования энергоресурсов в производстве энергии.

Критерием для сравнения технологических схем на природном газе и газе, полученном из угля, выступает себестоимость полученной энергии, срок окупаемости, капитальные и эксплуатационные затраты. В том случае, если технологическая схема с газификацией угля не удовлетворяет запросам потребителей по себестоимости энергии, варьируются режимные параметры блока газификации, либо подбирается другой вид топлива.

Обсуждение

При использовании в качестве основного топлива низкосортного бурого угля была выбрана схема, в которой измельченный в молотковой мельнице уголь проходит стадию сушки воздухом, а затем подается в поточный газогенератор с парокислородным дутьем. Результаты проведенных расчетов показали, что газификация пыли Березовского бурого угля в поточном газогенераторе позволяет получить газ с теплотой сгорания $12,5 \text{ МДж/м}^3$, который может использоваться в качестве топлива для энергетических установок. Дальнейшей задачей исследований является определение параметров оборудования по следующим критериям оценки:

- Состав топлива (горючие компоненты, влажность, зольность, выход летучих);
1. Термодинамические характеристики исходного топлива;
 2. Размер частиц и содержание влаги после измельчения и сушки;
 3. Расход горячего воздуха на процесс сушки и способ отбора;
 4. Расход пара и кислорода на дутье, расход исходного топлива;
 5. Выход и состав генераторного газа, теплотворная способность, термодинамические параметры газа,
 6. Расход золы и шлака
 7. Выбор ГТУ и ее расчет с определением выхода и состава дымовых газов и определение электрического КПД.
 8. Выбор ПТ и ее расчет с определением общей мощности ПГУ.

Выводы

Повышение эффективности использования низкосортного угля возможно на основе внедрения многоцелевых и безотходных технологий, одной из которых является газификация. Система подготовки угля на основе газификации может быть включена в технологический цикл ПГУ. На основании проведенного литературного обзора и результатов расчета процесса газификации Березовского угля была разработана схема использования генераторного газа из низкосортного угля в ПГУ. С целью снижения расходов на эксплуатацию оборудования, экономии ценного сырья для химической промышленности и снижения вреда экологии был предложен алгоритм разработки технологической схемы ПГУ, использующей внутрицикловую газификацию. Критериями оценки эффективности технологии ПГУ на генераторном газе из низкосортного топлива являются расходы, термодинамические параметры, теплотехнические свойства исходного топлива, окислителя генераторного газа. Для энергетической установки такими параметрами является тепловая и электрическая мощность, КПД, расходы топлива и воздуха. Критерием для сравнения технологических схем на природном газе и газе, полученном из угля, выступает себестоимость полученной энергии, срок окупаемости, капитальные и эксплуатационные затраты.

Литература

1. Giampaolo A. Gas turbine handbook. Principles and practices. 2006. 466 p.
2. Каранова Д.А., Маленков А.С., Комаров И.И. Эффективность использования топливных элементов в составе энерготехнологического комплекса с газификацией угля // Сборник трудов 3 научно-технической конференции студентов. 20-22 мая 2020 г. Москва. С. 20-25.
3. Нестеров П.М., Митрохова О.М., Плешанов К.А. Разработка турбоустановок, входящих в состав ПГУ, работающей на твердом топливе // Сборник трудов 3 научно-технической конференции студентов. 20-22 мая 2020 г. Москва. С. 43-47.

4. Бзаров А.Б. Особенности подготовки ПНГ для использования в ГТУ. <http://www.turbine-diesel.ru/rus/node/2721>, дата обращения 15.03.2021 г.
5. Кайраткызы А., Горелов М.В., Комаров И.И. Энергетический комплекс для выработки электроэнергии за счет сжигания продуктов газификации ТКО // Сборник трудов 3 научно-технической конференции студентов. 20-22 мая 2020 г. Москва. С. 170-175.
6. Полинская А.А., Максимов В.В., Зубарев К.В. Адаптация газопоршневых двигателей для работы на промышленных газах // Сборник научных трудов национальной научно-практической конференции «Образование. Транспорт. Инновации. Строительство». Омск, 19-20 апреля 2018 года. С. 145-150.
7. Касымов Ш.А., Тохтахунов К.А., Кучинов Х.А. Использование генераторного газа из низкосортного бурого угля Ангрэнского месторождения в парогазотурбинной установке // Сборник материалов 4 Всероссийской научно-практической конференции Энергетика и энергосбережение: Теория и практика. Кемерово, 19-21 декабря 2018 года. С. 136.1-136.5.
8. Gu J., Yang S., Kokossis A. Modeling and Analysis of Coal-Based Lurgi Gasification for LNG and Methanol Coproduction Process. Processes. 2019.7. doi:10.3390/pr7100688.
9. Петров И.В. Экономическая оценка энергоэффективности углеэнергетических технологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 81. С. 180-189.
10. Рыжков А.Ф., Попов А.В. Анализ эффективности современных промышленных технологий газификации угля // Энергетик, 2012. №10. С. 22 – 25.
11. Toporov D., Abraham R. Gasification of low-rank coal in the High-Temperature Winkler (HTW) process // J. S. Afr. Inst. Min. Metall. 2015. V.115. №. 7. doi:10.17159/2411-9717/2015/V115N7A5.
12. Toporov D., Abraham R. Entrained Flow Gasifiers: the Thyssenkrupps Prentlo Technology Conference: 12th Int. Conference on Energy for a Clean Environment At: Lisbon, Portugal. 2015.
13. Sokolinskii S.M., Khudyakov Yu., Lapidus D. A. Calculation of a Direct-Flow Coal Gasification Process with Liquid Slag Removal. Solid Fuel Chemistry. 2020. 54. pp. 269-273. doi:10.3103/S0361521920050092.
14. Mishra A., Gautam S., Sharma T. Effect of operating parameters on coal gasification. International Journal of Coal Science & Technology. 2018. V.5. pp.113–125.
15. Cong W., Alade O.S., Sasaki K, Sugai Y. Experimental and simulation studies on gasification characteristics of a low-rank coal by rapid heating under CO₂-rich condition // J. appl. res. Technol. 2018. V.16. №4.
16. Пряткина В.С., Белов А.А., Иванов В.В. и др. Газификация угля и ее применение в энергетике // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. 2018. №3. С. 42-47.
17. Сафиев Х., Холджонов С.Т., Каримов Э.Х. и др. Физико-химические основы процесса производства генераторного газа из углей Таджикистана // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. 2020. № 2. С. 195-204.
18. Способ газификации бурых углей: пат. 2543194 Рос. Федерация №201314782/05; заявл. 28.10.2013; опубл. 27.02.2015, Бюл. №6.
19. Способ газификации низкорекреационных твердых топлив: пат. 2600639 Рос. Федерация № 2015136560/05; заявл. 27.08.2015; опубл. 27.10.2016, Бюл. № 3.
20. Саламов А. А. Парогазовые установки с внутрицикловой газификацией твердого топлива // Энергетика за рубежом. 2009. №1. С.12-15.
21. Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю., Топал А.И. Экологически чистые угольные энерготехнологии. Киев: Наукова думка, 2004. 187 с.
22. Energy Efficiency Technology. ANNEX III. Technical Report. 2013 <https://www.worldenergy.org/assets/downloads/EE-Technologies-ANNEX-III-Energy-Efficient-Solutions-for-Thermal-Power-Solutions.pdf> (Дата обращения 19.03.2021 г.)
23. Монастырева Т.Н. Технико-экономическая оценка внедрения технологий газификации углей на тепловых электростанциях // Сборник научных статей Современная наука. 2011. №3(8). С. 99-102.
24. Строков А.А., Епихин А.Н., Тимашков К.В., и др. Повышение эффективности парогазовых установок с газификацией углей за счёт высокотемпературной сероочистки генераторного газа с применением природного хемосорбента // Электрические станции. 2016. № 6(1019). С. 22-27.
25. Аникин А.Е., Галицкий Г.В. Буроугольный кокс Березовского месторождения Канско-ачинского бассейна: производство, свойства, применение // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2014. №3(9). С. 52-59.

26. Вандышева С.С., Мингалеева Г.Р. Исследование термодинамических параметров процесса газификации под давлением в поточном газогенераторе // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 2. С. 171-175.

Авторы публикации

Савина Мария Валерьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение», Казанский государственный энергетический университет.

Тимофеева Светлана Сергеевна – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Энергетическое машиностроение», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Giampaolo A. *Gas turbine handbook. Principles and practices*. 2006. 466 p.
2. Karanova DA, Malenkov AS, Komarov II. *Efficiency of fuel cells in the energy technological complex with coal gasification*. Proceedings of the III Scientific and Technical Conference of Students. May 20-22, 2020. pp.20-25.
3. Nesterov PM, Mitrokhova OM, Pleshanov KA. *Development of turbine units, which are part of solid fuel CCGT*. Proceedings of III scientific-technical conference of students. May 20-22, 2020. pp. 43-47.
4. Bzarov AB. *Peculiarities of APG preparation for use in GTU*.
5. Kairatkyzy A., Gorelov M.V., Komarov I.I. *Energy complex for generating electricity by combustion of products of gasification of MSW*. Proceedings of the III Scientific and Technical Conference of Students. May 20-22, 2020. pp.170-175.
6. Polynskaya AA, Maksimov VV, Zubarev KV. *Adaptation of gas-piston engines for industrial gases*. Collection of scientific papers of the national scientific-practical conference «Education. Transport. Innovations. Construction». Omsk, 19-20 April 2018. pp.145-150.
7. Kasymov ShA, Tokhtakhunov KA, Kuchinov HA. *The use of generator gas from low-grade lignite Angren field in a steam-gas turbine unit*. Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference Power Engineering and Energy Saving: Theory and Practice. Kemerovo, December 19-21. 2018;136:1-136.5.
8. Gu J, Yang S, Kokossis A. *Modeling and Analysis of Coal-Based Lurgi Gasification for LNG and Methanol Coproduction Process*. Processes. 2019.7.doi:10.3390/pr7100688.
9. Petrov IV. Economic assessment of the energy efficiency of coal energy technologies. *Mountain Information and Analytical Bulletin*. 2014;81:180-189.
10. Ryzhkov AF, Popov AV. Analysis of Efficiency of Modern Industrial Coal Gasification Technologies. *Energetik*. 2012;10:22-25.
11. Toporov D, Abraham R. Gasification of low-rank coal in the High-Temperature Winkler (HTW) process. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall*. 2015;115(7). doi:10.17159/2411-9717/2015/V115N7A5.
12. Toporov D, Abraham R. *Entrained Flow Gasifiers: the Thyssenkrupp Prentflo Technology Conference*: 12th Int. Conference on Energy for a Clean Environment At: Lisbon, Portugal. 2015.
13. Sokolinskii SM, Khudyakov Yu, Lapidus DA. Calculation of a Direct-Flow Coal Gasification Process with Liquid Slag Removal. *Solid Fuel Chemistry*. 2020;54:269-273. doi:10.3103/S0361521920050092.
14. Mishra A, Gautam S, Sharma T. Effect of operating parameters on coal gasification. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2018;5:113–125.
15. Cong W, Alade OS, Sasaki K, Sugai Y. Experimental and simulation studies on gasification characteristics of a low-rank coal by rapid heating under CO₂-rich condition. *J. appl. res. Technol*. 2018;16(4).
16. Pryatkina VS, Belov AA, Ivanov VV. et al. Coal gasification and its application in power engineering. *Izvestia vuzov. North Caucasus region*. 2018;3:42-47.
17. Safiev H, Kholjonov ST, Karimov EK. et al. Physical and chemical bases of the process of generating gas from coals of Tajikistan. *Bulletin of Tajik National University. Series of Natural Sciences*. 2020;2:195-204.
18. Pat. 2543194 RF. *Method of lignite gasification*. Appl. 28.10.2013; Publ. 27.02.2015. Bull. No. 6.
19. Pat. 2600639 RF. *Method of gasification of low-reactive solid fuel*. Appl. 27.08.2015; Publ. 27.10.2016. Bull. No. 3.

20. Salamov AA. Steam-gas units with intra-cycle gasification of solid fuel. *Power Engineering Abroad*. 2009. 1:12-15.

21. Korchevoy YP, Maistrenko AY, Topal AI. *Ecologically Clean Coal Power Technologies*. Kyiv: Naukova Dumka, 2004. 187 p.

22. Energy Efficiency Technology. ANNEX III. Technical Report. 2013 <https://www.worldenergy.org/assets/downloads/EE-Technologies-ANNEX-III-Energy-Efficient-Solutions-for-Thermal-Power-Solutions.pdf>.

23. Monastyreva TN. Technical and economic assessment of the introduction of coal gasification technologies at thermal power plants. *Collection of scientific papers Contemporary Science*. 2011;3(8):99-102.

24. Stokov AA, Epikhin AN, Timashkov KV, Krylov IO. Improvement of efficiency of coal gasification steam-gas plants due to high-temperature desulfurization of generator gas using natural chemisorbent. *Electric Stations*. 2016;6 (1019):22-27.

25. Anikin AE, Galitsky GV. Burocoal Coke from the Berezovskoye Field of the Kansk-Achinsk Basin: Production, Properties, Application. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2014;3(9):52-59.

26. Vandysheva SS, Mingaleeva GR. Investigation of thermodynamic parameters of the process of gasification under pressure in an in-line gas generator. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2010;2:171-175.

Authors of the publication

Mariya V. Savina – Kazan State Power Engineering University. E-mail: pmv_83@mail.ru

Svetlana S. Timofeeva – Kazan State Power Engineering University. E-mail: zvezdochka198512@mail.ru

Получено

18 июня 2021г.

Отредактировано

25 июня 2021г.

Принято

28 июня 2021г.