

УДК 66.045.1

Товажнянский Л.Л., Зебешев Т.З., Перевертайленко А.Ю., Капустенко П.А.,
Бухкало С.И., Комутова А.С.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ОСНОВНЫХ СХЕМ ГАЗИФИКАЦИОННЫХ АГРЕГАТОВ БОЛЬШОЙ ЕДИНИЧНОЙ МОЩНОСТИ

Введение. Газификация топлив является одним из процессов термохимической конверсии, в ходе которого производится превращение углеродосодержащего топлива в синтез-газ, состоящий главным образом из смеси водорода и окиси углерода, который затем может быть использован в качестве сырья для получения аммиака, метанола, водорода, углеводородов по методике Фишера-Тропша, заменителя природного газа и некоторых других продуктов. Синтез-газ может быть также использован как топливо в производстве электроэнергии по комбинированному циклу.

В качестве сырья для газификации может быть использован широкий спектр углеродсодержащих веществ, в том числе, угли, тяжелые малоценные фракции и отходы нефтепереработки, биомасса, твердые бытовые отходы, а также смеси этих ингредиентов.

В условиях дефицита природного газа и нефти, сложившегося в силу тех или иных обстоятельств, и колебаний цен на них газификации уделяется в настоящее время все большее внимание.

Анализ состояния вопроса. Согласно информации, представленной в источниках [1–3] к крупным газификационным агрегатам относятся те агрегаты, которые вырабатывают синтез-газ, пригодный для синтеза таких химических продуктов, как аммиак, метанол, синтетические топлива, заменитель природного газа, а также электроэнергии по комбинированному циклу в объеме более 100 МВт в тепловом эквиваленте. Основным сырьем для таких агрегатов является уголь, тяжелые малоценные нефтепродукты и отходы нефтеперерабатывающих производств, нефтекокс.

Подобные газификационные агрегаты работают в настоящее время в 18 странах мира. В азиатско-тихоокеанском регионе сосредоточено 37 % всех мощностей (КНР, Индия, Япония, Республика Корея, Сингапур, Тайвань), затем идет Африка, 22 %, (ЮАР, Египет), Европа, Северная Америка и Латинская Америка (Бразилия, Доминиканская Республика).

Среди производимой продукции первое место занимает химическая продукция, 45 %, (аммиак, метанол, продукты органического синтеза); затем жидкие синтетические топлива, 38 %; электроэнергия – 11 %; заменитель природного газа и газообразные топлива – 6 %. Из 37 разработанных в 1930-х–1990-х годах технологий газификации для крупных агрегатов [4] в настоящее время промышленное применение нашло не более десяти:

- Sasol Lurgi, выработка синтез-газа 25 % от мировой;
- Shell (40 %) в двух модификациях:
 - для газификации жидкого сырья (SGP),

- для газификации твердого сырья (SCGP);
- General Electric (до 2004 г. Техасо), 24 %, в трех модификациях:
 - с прямым контактным водяным охлаждением синтез-газа (GE-ПКВО),
 - с радиантным теплообменником-парогенератором (GE-R),
 - с радиантным и конвективным теплообменниками-парогенераторами (GE-RC);
- ECUST OMB (разработка Восточно-Китайского университета науки и технологии, КНР), 5,5 %;
- E-Gas (ConocoPhillips), Prenflo (Krupp Uhde), Siemens, Mitsubishi HI, KBR – вместе 5,5 %.

В период 2010–2015 гг. наблюдался рост количества газификационных агрегатов большой единичной мощности, главным образом, в Китайской Народной Республике [5]. Сырьем для этих агрегатов являются угли, в том числе, бурые угли.

В 2013 году суммарная производительность газификационных агрегатов превысила 100 Гвт.ч в тепловом эквиваленте [6], причем 60 % из них приходится на Азиатско-Тихоокеанский регион, главным образом, на КНР (свыше 50 %).

Приоритетной продукцией осталась химическая продукция – до 60 Гвт.ч потребления синтез-газа в тепловом эквиваленте. Основным сырьем для производства синтез-газа в 2013–2015 гг. являются угли [5,6]. На данный период времени наибольшее количество синтез-газа было выработано по технологии Shell и General Electric (32 и 25 Гвт.ч синтез-газа в тепловом эквиваленте соответственно).

Газификационный агрегат состоит из нескольких химико-технологических (ХТС) и технологических (ТС) систем, каждая из которых имеет теплообменную систему (ТОС).

Информация, содержащаяся в источниках [7,8], позволяет утверждать, что основными логистическими факторами, определяющими выбор технологии газификации для крупных агрегатов являются: природа, качество и состав газифицируемого сырья, номенклатура целевых продуктов, экологические требования по вредным выбросам а также эмиссии парниковых газов, месторасположение агрегата относительно крупных производственных комплексов, возможности конверсии отходов в товарные продукты.

Изложение основного материала исследований. Рассмотрим основные характеристики и особенности приведенных выше газификационных технологий.

Технология Sasol Lurgi (в настоящее время Sasol^R FBDBTM) [9,10] предназначена для газификации угля с дальнейшим использованием полученного синтез-газа как сырья для получения синтетических жидких топлив и углеводородов по методу Фишера-Тропша. По этой технологии газифицируются все некоксующиеся угли, включая бурый уголь и антрацит. Спекающиеся угли подвергаются предварительной термоокислительной обработке. Состояние газифицируемого слоя – насыпной псевдопокоящийся слой. Сухое золоудаление через колосниковую решетку на дне газификатора. Дутье – парокислородное, уголь движется относительно газифицирующего агента противотоком. Высшая температура в слое топлива составляет 700–1000 °С, процесс проводится под давлением 2,4–3,5 МПа. ХТС газификации, включает ТОС охлаждения высокотемпературного газа (ОВГ). При упомянутых температурах процесса сырой син-

тез-газ содержит достаточное количество непрореагировавших продуктов пиролиза: смолы, фенолы, мелкие частицы углерода, а также аммиак и тяжелые углеводороды. Синтез-газ покидает газификатор с температурой 550 °С, что объясняется его охлаждением в газификаторе при контакте с поступающим в аппарат углем. Тепло горячего синтез-газа идет на пиролиз и сушку угля. Выйдя из газификатора сырой синтез-газ поступает в оросительный скруббер, где происходит его первичная очистка и охлаждение до 200–205 °С. Далее синтез-газ поступает на охладители 2-й ступени. На всей стадии ОВГ из синтез-газа конденсируются различные примеси и водяные пары. Конденсат синтез-газа поступает на очистку. Синтез-газ поступает в смолоотделитель и затем в систему низкотемпературного охлаждения синтез-газа (НОСГ), где охлаждается до температуры не выше 30 °С перед установкой очистки от сернистых соединений. В технологии Sasol Lurgi, как правило, применяется абсорбционный способ очистки Ректизол, который позволяет производить очистку синтез-газа от H₂S, COS, CO₂, а также HCN без предварительной стадии гидролиза.

Система охлаждения газификатора предусматривает подачу подготовленной воды в рубашку аппарата, в которой вода испаряется, и образовавшийся пар с давлением около 30 бар смешивается с дутьевым паром, подающимся в нижнюю часть газификатора. В парогенераторе также генерируется пар с давлением 3–7 бар.

В установке разделения газового конденсата производится выделение смол, затем конденсат поступает на выделение фенолов на установку Phenosolvan, где применяются процессы экстракции и ректификации. ТОС этой установки включает позицию предварительного подогрева конденсата, рекуперативную позицию подогрева потока после экстрактора потоком с низа основной ректификационной колонны, а также холодильники-конденсаторы ректификационных колонн. В качестве продуктов образуются сырые фенолы и аммиак.

Базовым аппаратом технологии Sasol Lurgi в настоящее время является газификатор модели MkIV с производительностью около 55 тонн в час по исходному углю. Всего установлено 83 таких газификатора на пяти крупных газификационных агрегатах в ЮАР, США и Китае. Кроме жидких синтетических топлив производится аммиак и метанол[11].

Технология Shell SGP [12,13] предназначена для газификации жидких тяжелых малоценных фракций переработки нефти, а также жидких отходов нефтеперерабатывающих производств. Газификация происходит в спутном потоке сырья и газифицирующего агента. Применяется парокислородное дутье. Газификация в потоке позволяет достигать температур процесса до 1300–1350 °С, процесс проводится при давлении 30–65 бар. Система ОВГ включает первичный охладитель – парогенератор, в котором синтез-газ, выходящий из газификатора, охлаждается до температуры не выше 400 °С, генерируя насыщенный пар высокого давления (порядка 100 бар). Далее синтез-газ проходит первый экономайзер (рис. 2), контактный водяной охладитель, в котором улавливается большая часть образовавшейся в газификаторе сажи и золы, второй экономайзер и поступает в насадочный скруббер, где происходит его дальнейшее охлаждение и улавливание оставшейся сажи. Насадочный скруббер орошается фильтратом скрубберной воды из отделения очистки скрубберной воды.

Внутренняя часть газификатора обмурована устойчивым к высоким температурам огнеупорным материалом. Синтез-газ поступает в трубную часть охладителя-

парогенератора, в то время, как пар генерируется в межтрубном пространстве. Подготовленная питательная вода поступает в парогенератор после предварительного нагрева в экономайзерах.

Система очистки скрубберной воды предусматривает отделение органической части, которая возвращается в газификатор, и неорганики, из которой извлекают соединения металлов, представляющие товарную ценность.

Технология разработана в 1950-е гг. и постоянно совершенствуется. Наиболее крупными являются подобные агрегаты Брунсбюттеле (Германия, 1978 г.), Пернисе (Нидерланды, 1997 г.), в Санназаро (Италия, 2006 г.).

Технология Shell SCGP [14] используется для газификации различных углей, начиная от бурых углей (лигнитов) и заканчивая антрацитами. Технология была разработана в 1974–1981 гг. совместно с Krupp-Koppers. Сырье (уголь) подается в сухом измельченном виде. Газификация проводится в спутном потоке с применением парокислородного дутья. Система ОВГ данной технологии подробно описана в [15] и включает смешение сырого горячего синтез-газа с очищенным холодным синтез-газом, а также конвективный парогенератор. Одной из характерных особенностей системы охлаждения газификатора является применение водотрубных стенок зоны газификации, внутри трубок циркулирует охлаждающая вода под высоким давлением, которая, нагреваясь, образует пароводяную смесь. Образующийся при газификации жидкий шлак стекает сверху вниз, образуя защитный слой с низкой теплопроводностью на поверхности трубок, при этом полностью исключен контакт горячего шлака с обмуровкой газификатора и, следовательно, нет коррозионного воздействия шлака на обмуровку. Это позволяет газифицировать угли с относительно высоким содержанием золы без ремонтов газификатора, связанных с заменой обмуровки. В настоящее время ведутся разработки газификаторов Shell с прямым контактным водяным охлаждением.

На агрегате в Буггенуме (Нидерланды) производится ко-газификация угля, нефтекокса, биомассы и отходов птицеводства. В Китае в 2006–2010 гг. введено в эксплуатацию около 12 газификационных агрегатов, в основном, с использованием полученного синтез-газа для получения аммиака, метанола и других химпродуктов.

Технология GE Energy (Texaco) [16,17] используется при газификации как твердого, так и жидкого сырья. Газификация проводится в спутном потоке с применением парокислородного дутья. При газификации твердого сырья (уголь, нефтекокс) предусмотрена подача сырья в газификатор в виде водоугольной смеси. Конструкция газификатора для конверсии твердого или жидкого сырья одинакова, внутренние стенки реактора обмурованы. Температура газификации составляет 1250–1450 °С, давление 3 МПа для получения синтез-газа, используемого для выработки электроэнергии по комбинированному циклу (КЦКГ) и 6–8 МПа для получения водорода и продуктов синтеза (аммиак, метанол и др.). Технология предусматривает три варианта системы ОВГ:

- с прямым контактным водяным охлаждением синтез-газа (GE-ПКВО);
- с радиантным теплообменником-парогенератором (GE-R);
- с радиантным и конвективным теплообменниками – парогенераторами (GE-RC).

Второй вариант является промежуточным. В этом случае прямое контактное водяное охлаждение синтез-газа осуществляется после радиантного теплообменника-

парогенератора. В первом и втором случае образуется высокое содержание водяных паров в синтез-газе, что значительно упрощает узел конверсии окиси углерода, который необходим при получении химических продуктов, некоторых топлив и водорода.

Технология Техасо была разработана в конце 1950-х гг. для газификации жидких нефтепродуктов, в 1973 г. – для газификации угля. К настоящему времени эксплуатируется. На КЦКГс газификацией смеси угля и нефтекокса, установленном в Полк (Tampa Electric, США) для ОВГ последовательно используются радиантный и конвективный теплообменники-парогенераторы [18].

Технология ConocoPhilips (E-Gas), известна также как Dectec, разработана компанией Dow в 1970-е гг. [19]. Предназначена для газификации угля, который подается в газификатор в виде водоугольной суспензии. Газификация проходит в спутном восходящем потоке в две стадии при температуре 1350–1400 °С и давлении около 3 МПа.

Синтез-газ, полученный на первой стадии, поднимается в верхнюю часть газификатора, куда подается 20 % водоугольной суспензии. Это позволяет получить синтез-газ с достаточно высокой теплотворной способностью и снизить его температуру на выходе до 1050 °С. Изнутри газификатор обмурован. ОВГ включает жаротрубный парогенератор, снижающий температуру синтез-газа до 370 °С, после чего последний поступает на очистку. Для газификации применяется парокислородное дутье. Крупный агрегат – КЦКГ – установлен в Уэйбеш Ривер (США) для производства электроэнергии свыше 300 МВт при газификации 2200 т/сут угля с высоким содержанием серы.

Процесс имеет существенные преимущества при получении заменителя природного газа из угля, так как в синтез-газе содержание метана выше, чем в остальных процессах газификации, проходящих в спутном потоке, но в одну стадию.

Технология ECUST OMB [20] аналогична технологии Техасо и предназначена для газификации углей. Газификация происходит в спутном потоке, измельченный уголь подается в виде водоугольной суспензии. Для охлаждения синтез-газа применяется принцип ПКВО.

Процесс проходит под давлением 4–6,5 МПа при кислородном дутье.

Разработана модификация технологии с радиантным теплообменником-парогенератором, позволяющая использовать данную технологию для производства электроэнергии (КЦКГ).

Технология ECUST OMB реализована на крупнотоннажных газификационных агрегатах, целевыми продуктами производства которых являются аммиак и метанол.

Технология Siemens (Siemens Fuel Gasification Technology – SFGTM) разработана в 1975 г. компанией DBI (ФРГ) для газификации низкосортных углей Германии. В 1991 г. группа Noell применила эту технологию с соответствующими модификациями для газификации жидких нефтепродуктов. Газификаторы также эксплуатировались под марками Babcock-Borsig и FutureEnergy. С 2008 г. технология приобретена компанией Siemens [21]. Процесс проходит в спутном потоке при паро-кислородном дутье; температурный диапазон: 1300–1800 °С, давление около 4 МПа. Имеется две модификации газификаторов: для жидкого сырья и малозольных углей (менее 2 %) применяются газификаторы с внутренней обмуровкой, а для углей с зольностью выше 2 % применяются водотрубные стенки зоны газификации (т.н. мембранные стенки). Для твердого сырья применяется система его подачи в газификатор в сухом измельченном виде. Базовой конструкцией газификатора для крупных газификационных агрегатов по техноло-

гии Siemens является аппарат SFG-500 производительностью 500 МВт тепла в эквиваленте [21].

Охлаждение зоны газификации с помощью мембранных стенок происходит аналогично подобным газификаторам Shell с той разницей, что в газификаторах Siemens в трубки подается вода под высоким давлением и парообразования не происходит, зато во внешней рубашке охлаждения генерируется пар низкого давления. Технология Siemens является универсальной для газификации углей, начиная от лигнитов и заканчивая антрацитами. С 1984 по 2010 г. смонтировано и пущено в эксплуатацию четыре крупных газификационных агрегата. Так в составе КЦКГ Вржешова (Чехия) газификатор Siemens установлен для газификации смол и жидких органических отходов, образующихся после газификации бурого угля в 26 газификаторах Lurgi. В 2009–2010 гг. в Китае были сданы в эксплуатацию два крупнотоннажных газификационных агрегата для получения аммиака и метанола при газификации твердых углей и антрацита.

В качестве ОБГ применяется ПКВО синтез-газа. Секция ПКВО расположена в нижней части газификатора. В настоящее время компанией Siemens разработана конструкция газификатора со встроенным радиантным теплообменником-парогенератором, охлаждающим синтез-газ до 700–800 °С. Это позволит применить данную технологию для производства электроэнергии.

Технология *PRENFLO* [22] разработана компаниями Krupp и Shell. С 1981 г. исключительные права на ее использование принадлежат компании Krupp Uhde.

Технология предназначена для газификации углей и нефтекокса. Осуществляется пневмоподача измельченного сухого топлива в газификатор. Газификация проходит в спутном потоке с паро-кислородным дутьем при температуре около 1600 °С. На выходе из камеры газификации горячий синтез-газ разбавляется холодным очищенным синтез-газом и с температурой около 800 °С поступает в теплообменник-парогенератор, где охлаждается до 380 °С и далее идет на очистку. Разработана также конструкция газификатора, в котором применяется ПКВО.

Промышленной инсталляцией технологии является крупнейшее в мире КЦКГ, работающее на твердом топливе в Пуэрто-Лано (Испания) мощностью 338 МВт по электроэнергии. В качестве топлива использовалась смесь угля и нефтекокса. Агрегат находится в работе с 1996 г. [23].

Выводы. Рассмотрены основные технологии, применяющиеся в газификационных агрегатах большой единичной мощности. Процесс газификации является ресурсосберегающим и более экологически чистым, чем существующие процессы термохимической конверсии топлив и углеродосодержащих соединений, а также является более полигенеративным, так как полученный синтез-газ является сырьем для получения ряда химических продуктов, электроэнергии, водорода, жидких и газообразных топлив.

Основной проблемой теплообменной сети узла газификаторов является надежность работы теплообменных элементов и аппаратов, утилизирующих тепло горячего синтез-газа. Это лимитирует применение рекуперативных теплообменных аппаратов и напрямую связано со стадией очистки синтез-газа от механических примесей.

Перспективой для дальнейших исследований является изучение стадии очистки синтез-газа от соединений серы и улавливания углекислого газа и поиск возможностей построения эффективных теплообменных систем.

Благодарность. Авторы выражают признательность ГУ «Комитет науки Министерства образования и науки Республики Казахстан» (договор №98) за финансовую поддержку.

Литература

1. Handbook of Gasifiers and Gas-Treatment Systems. DoE/ET 10159 – T24, 1982.
2. IGCC State-of-art report. A part of EU-FP7 Sub Project 4, WP-1 – System analysis, University of Stavanger, Norway, 2010, 91 pp.
3. Gasification Technologies Project Portfolio, NETL, USDoE, Version 2006.
4. Gasification Database. Gasification Plant Report. NETL, USDoE, 2010, 191 pp.
5. China Gasification Database: Existing and Developmental Plants and Projects, July, 2014.
6. C. Higman. State of the Gasification Industry – the Updated Worldwide Gasification Database. – International Pittsburgh Coal Conference, September 16–19, 2013, Paper, 11 pp.
7. Strategic Issues for IGCC. Report CRN 08-16A, Bluewave Resources LLC, 2009 Update, Virginia, USA, 35 pp.
8. Мешалкин В.П., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А. (2006). Основы теории ресурсосберегающих интегрированных химико-технологических систем. Харьков: НТУ «ХПИ».
9. S. Mangena. Effective Utilization in Sasol Gasification Technology Perspective. – SACPS International Conference “Coal Powering the Future”, Secunda, South Africa, 2009, 12 pp.
10. J.C. van Dyk et al. Suitability of feedstocks for the Sasol-Lurgi fixed bed dry bottom Gasification process. – “Gasification Technologies”, 2001, San Francisco, 11 pp.
11. O. Turna. Sasol-Lurgi Fixed Bed Dry Bottom Gasification for Fuels and Chemicals. –Presentation at 2nd International Freiberg Conference, 8-12th May, 2007, 22 pp.
12. M. Mak. The Merits of Heavy Residue Gasification in Today;s World. – Presentation at Gasification Technologies Conference, 2010, 16pp.
13. J. Volk. Innovation in Gasification. – Presentation at Gasification Technologies Conference 2011, October 2011, 13 pp.
14. T. Kreutz. Shell Gasifier-based coal IGCC with CO₂ capture: partial water quench vs. Novel Water-Gas Shift. – Proceedings of ASME TurboExpo 2010, Glasgow, 10 pp.
15. R.D. Doctor et al. Life-Cycle Analysis of Shell Gasification-Based Multi-Product System With CO₂ Recovery. – The first National Conference on Carbon Sequestration, May 15–17, 2001, Washington, DC, USA, Paper, 29 pp.
16. O. Mourstad. An Overview of Coal Based IGCC Technology. MITLFEE 2005-02 WP. Massachusetts Institute of Technology, USA, Sept. 2005
17. Bottomless Refinery Gasification. Imagination of Work. – General Electric Presentation, 5/24/2010, 13pp.
18. Tampa Electric Polk Power Station IGCC Project. Final Technical Report. Cooperative Agreement DE-FC-21-91MC27363, August 2002, Tampa, FL, USA, 26 pp.
19. P. Amik. ConocoPhilips Petroleum Coke Gasification Synergies for Refineries. – Presentation, Gulf Coast Power Association, April 14, 2005, 17 pp.

20. Fuchen Wang. Coal Gasification Technology in China: Application and Development. – Presentation, 35 pp.

21. F. Hanemann et al. Siemens IGCC and Gasification Technology – Today’s Solution and Developments. – Presentation at 2nd International Freiberg Conference, 8–12 May 2007, 17 pp.

22. M. Heinritz-Adrian. PRENFLOTM for biomass and coal (co-) gasification. – Presentation at 4th International Freiberg Conference, 3–5 May, 2010, Dresden, Germany, 27 pp.

23. F. Garcia Pena. ELCOGAS IGCC Plant: Clean Coal Technology Experience and Future. – Presentation at Potsdam, May 14, 2004, OPET Network, 21 pp.

Bibliography (transliterated)

8. Meshalkin V.P., Tovazhnyansky L.L., & Kapustenko P.A. (2006). Osnovy teorii resursosberegaiushchih integrirovannykh khimiko-technologicheskikh system. Kharkov: NTU “KhPI”

УДК 66.045.1

Товажнянський Л.Л., Зебешев Т.З., Перевертайленко О.Ю., Капустенко П.О.,
Бухкало С.І., Комутова А.С.

**ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ОСНОВНИХ СХЕМ ГАЗИФІКАЦІЙНИХ
АГРЕГАТІВ ВЕЛИКОЇ ОДИНИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ**

Досліджено основні технології, що застосовуються у сучасних газифікаційних агрегатах великої одиничної потужності. Вказано на основну проблему у роботі теплообмінних елементів та апаратів, що утилізують тепло гарячого синтез-газу. Визначено перспективу подальших досліджень для побудови ефективних теплообмінних систем.

Tovazhnyansky L.L., Zebeshev T.Z., Perevertaylenko O.Yu., Kapustenko P.O.,
Buhkalo S.I., Komutova A.S.

**RESEARCH OF BIG GASIFICATION PLANTS PROCESSING SYSTEMS
STRUCTURE**

The basic gasification technologies used for big gasification plants were investigated. The main problem for heat exchange equipment processing of gasification island was underlined. The future researches direction was defined.