

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 620.9

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОХИМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫРАБОТКОЙ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГАЗА

А.Н. Мракин¹, Д.Г. Сотников¹, О.В. Афанасьева²

¹Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,
г. Саратов, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3982-9735>, anton1987.87@mail.ru

Резюме: В статье представлен обзор современного состояния работ по комплексному использованию углеводородного сырья для энергообеспечения промышленных и коммунально-бытовых потребителей, а также генерации технологического газа. Предложена тепловая схема энергохимической установки с комбинированной выработкой энергоносителей (тепловой и электрической энергии) и технологического газа, содержащего H_2 и CO . Зарегистрирован программный продукт в виде математической модели реактора частичного окисления, который позволил оценить параметры синтез-газа при коэффициенте расхода воздуха $\alpha=0,7$, степени повышения давления $\pi_k=5$ и удельном расходе водяного пара $6,5$ кг/кг ($N_2=35,8\%$; $H_2O=50,2\%$; $CO_2=5,9\%$; $CO=2,6\%$; $H_2=5,5\%$ и температура $1570^\circ C$), а также геометрические размеры аппарата $D=1,3$ м и $L=10,8$ м.

Ключевые слова: топливо, окислитель, дутьевой пар, синтез-газ, энергохимическая установка, энергоноситель.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-10036).

DEVELOPMENT OF ENERGY-CHEMICAL INSTALLATION WITH COMBINED PRODUCTION OF ENERGY CARRIERS AND TECHNOLOGICAL GAS

A.N. Mrakin¹, D.G. Sotnikov¹, O.V. Afanaseva²

¹Saratov State Technical Gagarin Yu.A. University, Saratov, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3982-9735>, anton1987.87@mail.ru

Abstract: The article presents an overview of the current state of work on the integrated use of hydrocarbon raw materials for energy supply to industrial and domestic consumers, as well as generation of process gas. A thermal scheme of an energy-chemical plant with a combined production of energy carriers (thermal and electric energy) and a process gas containing H_2 and CO is proposed.

The software product was registered in the form of a mathematical model of a partial oxidation reactor, which made it possible to estimate the parameters of gas synthesis at an air flow coefficient of $\alpha=0,7$, a pressure increase of $\pi_k=5$, and a specific steam flow rate of 6,5 kg/kg ($N_2=35,8\%$, $H_2O=50,2\%$, $CO_2=5,9\%$, $CO=2,6\%$, $H_2=5,5\%$ and temperature 1570 °C), as well as geometrical dimensions of the apparatus $D=1,3$ m and $L=10,8$ m.

Keywords: fuel, oxidant, blowing steam, synthesis gas, energy-chemical plant, energy carrier.

Acknowledgments: The study was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation (project № 17-79-10036).

Введение

Низкое значение коэффициента извлечения традиционных углеводородов, проблема утилизации нестабильного газового конденсата на малых и средних месторождениях углеводородов, поскольку его стабилизация и транспортировка экономически целесообразна на крупных месторождениях или на специальных предприятиях, образование в больших объемах нефтешламов и отходов нефтепереработки, а также ограниченность традиционных легкодоступных ресурсов нефти, газа и газового конденсата побуждают разрабатывать меры по повышению энергетической эффективности технологических процессов, а также вовлекать в топливно-энергетический баланс альтернативные виды энергоносителей (нестабильный газовый конденсат, отходы нефтехимических производств, попутный нефтяной газ и другие) [1, 2]. При этом наиболее перспективным направлением является термохимическая конверсия углеводородов на базе пиролиза [3] или газификации [4], которые позволяют расширить сферу применения некондиционных топлив и организовать энерготехнологические установки с комбинированной выработкой энергоносителей и химических продуктов.

Теоретические основы и результаты

Известна технологическая схема парокислородной газификации жидких топлив по способу «Тексако» с получением газов для производства аммиака и спиртов [5]. Однако данная схема характеризуется повышенной металлоёмкостью системы очистки синтез-газа, вызванной применением двух скрубберов для поглощения CO_2 раствором карбоната и раствором моноэтаноламина. Кроме того, применение в качестве окислителя только кислорода связано с дополнительными энергозатратами на его получение.

Получение технологического газа для ведения восстановительных процессов возможно организовать на базе энергометаллургической установки [6], включающей конвертер для получения восстановительного газа, турбокомпрессор для подачи сжатого воздуха в конвертер и подключённый к конвертеру металлургический агрегат. При этом также возможна организация работы установки по второму варианту, отличающемуся тем, что к линии, соединяющей компрессор и конвертер, параллельно подключена установка для получения кислорода, т.е. такое решение позволяет только при необходимости задействовать энергоёмкий процесс получения кислорода. Но и такой вариант организации процесса не лишен недостатков: установка характеризуется большой поверхностью нагрева регенеративного подогревателя ввиду низкого коэффициента теплопередачи системы «газ–газ», вследствие чего возрастает металлоёмкость установки; применение катализатора для конверсии топлива связано с дополнительными капитальными затратами, а также затратами на его обслуживание и регенерацию.

Технологии частичного окисления топлива (газификации) находят распространение и в процессах комбинированной выработки электроэнергии и жидкого синтетического топлива с использованием газотурбинных и парогазовых установок [7], которые характеризуются: относительно низкой надёжностью ввиду большого числа элементов схемы; ограниченностью в выборе используемых топлив, т.к. основным топливом является

природный газ и работой газоохладителя при температуре 1100 °С, которая возможна только с применением дорогостоящих жаропрочных марок сталей.

Принцип смешения рабочих тел паровой и газовой частей реализуется в энергетической установке «Водолей» [8], включающей конденсатор, устанавливаемый на выходном патрубке котла-утилизатора для охлаждения газов до точки росы и конденсации паров в жидкую фазу, которую собирают и возвращают для последующей рециркуляции. При этом удаётся уловить воду, полученную в результате химической реакции в процессе сгорания топлива. Подвод части пара в зону горения камер сгорания ГТУ существенно снижает выбросы NO_x . Недостатками данной установки являются отсутствие выработки тепловой энергии и то, что химический потенциал топлива расходуется только на выработку электроэнергии, т.к. происходит полное окисление топлива, и синтез-газ не образуется.

Таким образом, существует актуальная задача по повышению качества получаемого синтез-газа, получению дополнительных целевых продуктов – тепловой энергии, N_2 и CO_2 , упрощению технологической схемы при снижении себестоимости вырабатываемых продуктов за счет рационализации капитальных затрат и оптимизации рабочих параметров.

Нами предлагается энергохимическая установка для получения синтез-газа, электрической и тепловой энергии на базе поточного газогенератора для термохимической конверсии газового конденсата, отходов нефтепереработки, природного газа и других углеводородов, тепловая схема которой показана на рисунке.

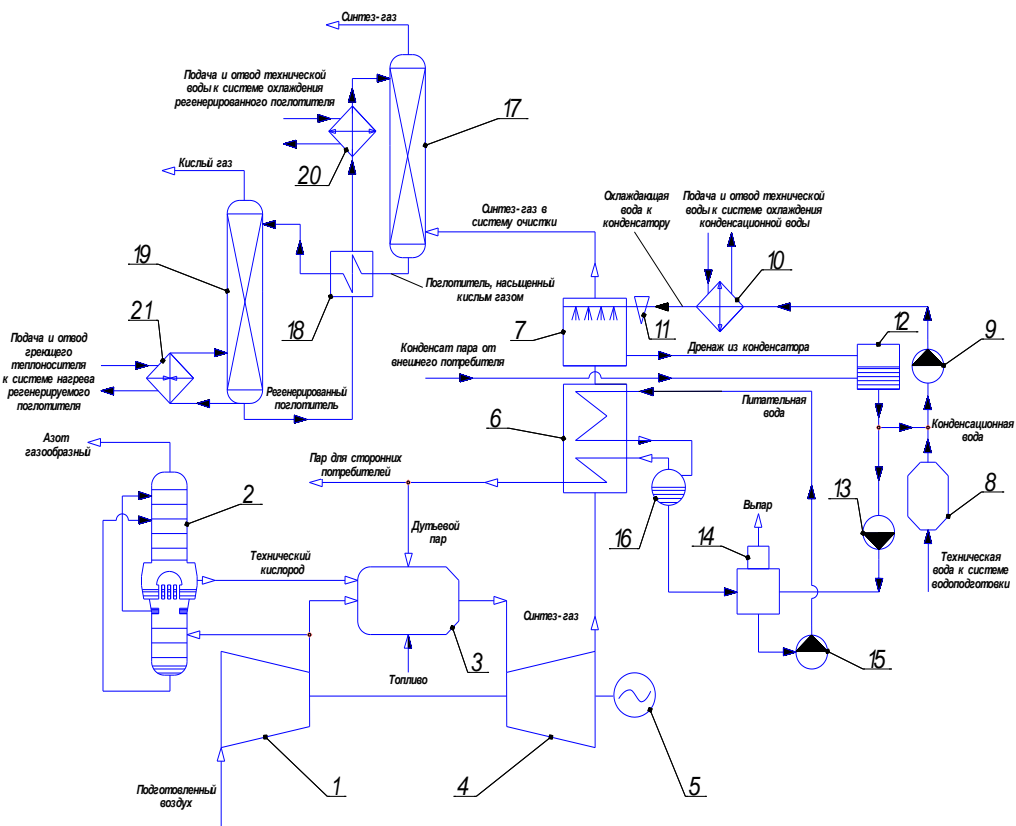


Рис. Принципиальная тепловая схема энергохимической установки: 1 – компрессор; 2 – воздухоразделительная станция; 3 – реактор частичного окисления; 4 – газовая турбина; 5 – электрогенератор; 6 – паровой котёл-утилизатор; 7 – контактный конденсатор; 8 – система водоподготовки; 9 – насос конденсационной воды; 10 – охладитель конденсационной воды; 11 – фильтр конденсационной воды; 12 – резервуар для хранения воды; 13 – конденсатный насос; 14 – деаэратор; 15 – питательный насос; 16 – сепаратор; 17 – скруббер для поглощения кислого газа жидким поглотителем; 18 – регенеративный теплообменник; 19 – регенератор жидкого поглотителя; 20 – холодильник; 21 – подогреватель жидкого поглотителя для регенерации

Установка работает следующим образом. Реактор частичного окисления 3 потребляет воздух, технический кислород (98% O₂) или их смесь (обогащённый кислородом воздух) от компрессора 1 и/или воздуходелительной станции 2 и водяной (дутьевой) пар от парового котла-утилизатора 6 для осуществления технологического процесса газификации жидкого или газообразного топлива. В качестве реактора частичного окисления 3 может быть использована выносная камера сгорания, расположенная в отдельном силовом корпусе и имеющая трубопроводы для подвода топлива, дутьевого пара, воздуха и/или кислорода и отвода газов, например камера сгорания ГТЭ-35 ХТЗ. Преобразование химической энергии топлива в тепловую осуществляется в процессе окисления. Процесс окисления в реакторе частичного окисления обеспечивается следующим: подачей воздуха (окислителя) и топлива в количестве, необходимом для создания смеси определённого состава; созданием необходимого температурного уровня; наличием зоны, где скорость перемещения топливовоздушной смеси равна скорости распространения пламени. Эта зона называется зоной стабилизации фронта пламени. Образование топливовоздушной смеси обеспечивается: дроблением топлива; перемешиванием топлива и окислителя; испарением жидкой фазы топлива. Дробление топлива осуществляется форсунками для жидкого топлива и газовыми насадками для газообразного топлива. Перемешивание топлива и окислителя происходит за счёт дополнительной турбулизации потока с помощью фронтального устройства.

Образовавшиеся в реакторе частичного окисления продукты реакции поступают в газовую турбину 4, приводящую во вращение электрогенератор 5. Отработавший синтез-газ с давлением, необходимым для преодоления аэродинамического сопротивления технологического оборудования и нормального ведения процессов синтеза, подают в котёл-утилизатор 6, где его охлаждают, и затем направляют в контактный конденсатор 7 для конденсации водяного пара, который отводится в резервуар для хранения воды 12. Далее синтез-газ подают в скруббер для поглощения кислого газа жидким поглотителем 17, дальнейшей очистки и доведения соотношения компонентов до требуемых значений по технологическому регламенту дальнейшего использования синтез-газа. Подготовленный таким образом синтез-газ, состоящий из азота, водорода и оксида углерода передают технологическому потребителю или могут использовать для генерации энергоносителей (тепловой и электрической энергии). Часть пара, вырабатываемого в котле-утилизаторе 6, подают в реактор частичного окисления 3, оставшийся пар реализуют потребителю. Электрогенератор 5 газотурбинной установки вырабатывает электрическую энергию, передаваемую потребителям. Из резервуара для хранения воды 12 через охладитель конденсационной воды 10, где конденсационная вода охлаждается технической водой из системы оборотного водоснабжения, и фильтр конденсационной воды 11 с использованием насоса конденсационной воды 9 и системы водоподготовки 8, связанной с трубопроводом подачи технической воды к системе водоподготовки, охлаждённая вода подаётся в контактный конденсатор 7. Конденсат от потребителя возвращают в резервуар для хранения воды 12, откуда через деаэратор 14 с использованием конденсатного насоса 13 и питательного насоса 15, питательная вода проходит через экономайзерно-испарительную часть котла-утилизатора 6 и попадает в сепаратор 16, где разделяется на пар и воду. Водяной пар проходит через пароперегревательную часть котла-утилизатора 6 и подаётся в реактор частичного окисления 3, а также отводится потребителю, а вода возвращается в деаэратор 14. Поглотитель, насыщенный кислым газом, из скруббера для поглощения кислого газа жидким поглотителем 17 подают в регенеративный теплообменник 18, где он забирает тепло у регенерированного поглотителя, и в регенератор жидкого поглотителя 19, где происходит процесс регенерации. При этом из нижней части регенератора жидкого поглотителя 19 отбирается часть регенерируемого поглотителя и проходит через подогреватель жидкого поглотителя для регенерации 21, где нагревается греющим теплоносителем из системы нагрева регенерируемого поглотителя, после чего возвращается в регенератор. Регенерированный поглотитель подают в теплообменник 18, где он отдаёт тепло поглотителю, насыщенному кислым газом, затем в холодильник 20, где

охлаждается технической водой из системы охлаждения жидкого поглотителя, после чего возвращают в скруббер для поглощения кислого газа жидким поглотителем 17.

Побочными продуктами технологического процесса являются газообразный азот от воздухоразделительной станции 2 и кислый газ от регенератора жидкого поглотителя 19.

Нами разработан специальный программный продукт [9], позволяющий проводить варианты расчеты по определению состава синтез-газа, его температуре и ряду других показателей в зависимости от коэффициента расхода воздуха, состава исходного топлива, параметров дутьевого пара, степени повышения давления в компрессоре и пр. Для примера приведем результаты расчета при использовании в качестве исходного топлива нестабильного газового конденсата следующего состава [10]: $\text{CH}_4=16,1\%$; $\text{C}_2\text{H}_6=3,1\%$; $\text{C}_3\text{H}_8=1,6\%$; $i\text{-C}_4\text{H}_{10}=1,1\%$; $n\text{-C}_4\text{H}_{10}=1,0\%$; $i\text{-C}_5\text{H}_{12}=0,5\%$; $n\text{-C}_5\text{H}_{12}=0,9\%$; $\text{C}_{6+}=73,8\%$; $\text{CO}_2=1,8\%$; $\text{CH}_3\text{OH}=0,1\%$; энтальпии дутьевого водяного пара $h=2681$ кДж/кг; температуре газового конденсата -27 °С, коэффициенте расхода окислителя $\alpha=0,7$, степени повышения давления $\pi_k=5$ и удельном расходе водяного пара $6,5$ кг/кг:

1) состав – $\text{N}_2=35,8\%$; $\text{H}_2\text{O}=50,2\%$; $\text{CO}_2=5,9\%$; $\text{CO}=2,6\%$; $\text{H}_2=5,5\%$.

2) температура – 1570 °С.

Также с использованием расчетных формул, представленных в работе [10], для переработки в реакторе частичного окисления 1400 кг/ч газового конденсата при нефорсированном режиме работы с удельной теплонапряженностью сечения камеры $U_F=120$ Вт/(м²·Па) были получены следующие геометрические размеры камеры: $D=1,3$ м и $L=10,8$ м.

Обсуждение

Таким образом, в предложенной энергохимической установке с газификацией топлива используется принцип ступенчатого охлаждения синтез-газа в котле-утилизаторе и контактном конденсаторе. При этом вырабатывается водяной пар, применяемый для повышения содержания водорода в получаемом синтез-газе, а непрореагировавший водяной пар без потерь выделяется в виде конденсата. Кроме того, за счёт комбинированной выработки энергоносителей снижается их удельная себестоимость и повышается технико-экономическая эффективность производства. Использование системы очистки синтез-газа от CO_2 жидким поглотителем на выходе из установки обеспечивает снижение вредных выбросов в окружающую среду, а применение меньшего числа элементов схемы, по сравнению с рассмотренными, ведет к повышению надежности.

Заключение

Предложена тепловая схема энергохимической установки для получения технологических газов пригодного для производства аммиака, спиртов, альдегидов и других химических продуктов, а также способная к интеграции в схемах энерготехнологического комбинирования при утилизации стабильного и нестабильного газового конденсата, отходов нефтехимических производств, при обеспечении потребителей водородосодержащим синтез-газом, электрической и тепловой энергией.

Литература

1. Lapidus A.L. Production of alternative motor fuels based on natural gas / Lapidus A.L., Golubeva I.A., Krylov I.F., Zhagfarov F.G. // Chemistry and technology of fuels and oils. 2009. Vol. 45. №5. P. 305–312.
2. Lapidus A.L. Chemical processing of natural gas and gas condensate / Lapidus A.L., Zhagfarov F.G., Grigor'eva N.A., Khudyakov D.S., Kozlov A.M. // Chemistry and technology of fuels and oils. 2010. Vol. 46. No. 2. P. 141–147.
3. Kaddour O. Production of olefin and aromatic hydrocarbons by pyrolysis of gas condensate / Kaddour O., Sherbi A., Busenna A., Kolesnikov I.M. // Chemistry and technology of fuels and oils. 2009. Vol. 45. No. 6. P. 440–442.
4. Malkov Yu.P. A converter for producing a hydrogen-containing synthesis gas / Malkov Yu.P., Molchanov O.N., Britov B.K., Fedorov I.A. // Journal of engineering physics and thermophysics. 2016. Vol. 89. No. 6. P. 1545–1553.

5. Рябцев И.И., Волков А.Е. Производство газа из жидких топлив для синтеза аммиака и спиртов. М.: Химия, 1968. 208 с.
6. Энергометаллургическая установка: а.с. №461238. СССР / Н.В. Лавров, В.Г. Каширский, В.Н. Лункин, С.Ф. Евланов, А.И. Попов. 1975. Бюл. 7.
7. Комбинированный способ производства электроэнергии и жидкого синтетического топлива с использованием газотурбинных и парогазовых установок: патент №2250872 Российской Федерации / Батенин В.М., Масленников В.М., Толчинский Л.С. 2005. Бюл. 12.
8. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 584 с.
9. Программа расчета реактора частичного окисления топлива: Программа для ЭВМ 2017615007 Российской Федерации / Д.Г. Сотников, А.Н. Мракин. 2017.
10. Мракин А.Н., Сотников Д.Г., Селиванов А.А. Построение расчетной модели определения геометрических размеров реактора частичного окисления топлива // Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса: сб. науч. тр. Вып. 8. Совершенствование энергетических систем и теплоэнергетических комплексов: материалы XIII Междунар. научно-техн. конф. Саратов: ИП Беглакова Е.С., 2016. С. 318–322.

Авторы публикации

Мракин Антон Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета (СГТУ) им. Гагарина Ю.А. E-mail:anton1987.87@mail.ru.

Сотников Дмитрий Геннадьевич – аспирант кафедры «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета (СГТУ) им. Гагарина Ю.А.

Афанасьева Ольга Валерьевна – канд. техн. наук, начальник ОИМС Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Lapidus A.L. Production of alternative motor fuels based on natural gas / Lapidus A.L., Golubeva I.A., Krylov I.F., Zhagfarov F.G. // Chemistry and technology of fuels and oils. 2009. Vol. 45. No. 5. P. 305–312.
2. Lapidus A.L. Chemical processing of natural gas and gas condensate / Lapidus A.L., Zhagfarov F.G., Grigor'eva N.A., Khudyakov D.S., Kozlov A.M. // Chemistry and technology of fuels and oils. 2010. Vol. 46. No. 2. P. 141–147.
3. Kaddour O. Production of olefin and aromatic hydrocarbons by pyrolysis of gas condensate / Kaddour O., Sherbi A., Busenna A., Kolesnikov I.M. // Chemistry and technology of fuels and oils. 2009. Vol. 45. No.6. P. 440–442.
4. Malkov Yu.P. A converter for producing a hydrogen-containing synthesis gas / Malkov Yu.P., Molchanov O.N., Britov B.K., Fedorov I.A. // Journal of engineering physics and thermophysics. 2016. Vol. 89. No.6. P. 1545–1553.
5. Ryabtsev I.I., Volkov A.E. Production of gas from liquid fuels for the synthesis of ammonia and alcohols. Moscow: Chemistry, 1968. 208 p.
6. Lavrov N.V., Kashirsky V.G., Lunkin V.N., Evlanov S.F., Popov A.I. Energometallurgical installation // C. of a. USSR No.461238. 1975. Bul. 7.
7. Batenin V.M., Maslennikov V.M., Tolchinsky L.S. Combined method of producing electric power and liquid synthetic fuels using gas turbine and combined-cycle plants // Patent of Russia No.2250872. 2005. Bul. 12.
8. Tsanev S.V., Burov V.D., Remezov A.N. Gas turbine and combined-cycle plants of thermal power plants. Moscow: Publishing house MEI, 2009. 584 p.
9. Sotnikov D.G., Mrakin A.N. Program for calculating the reactor of partial oxidation of fuel // Program for computer No. 2017615007. 2017.

© *А.Н. Мракин, Д.Г. Сотников, О.В. Афанасьева*

9. Mrakin A.N., Sotnikov D.G., Selivanov A.A. Construction of a calculation model for determining the geometric dimensions of a partial fuel oxidation reactor // Problems of improving the fuel and energy complex: coll. sci. tr. Issue. 8. Perfection of power systems and heat-and-power complexes: materials XIII Intern. scientific and technical. conf. Saratov: IP Beglakova E.S., 2016. P. 318–322.

Authors of the publication

Anton N. Mrakin – Cand. Sci. (Techn.), associate professor of Industrial Heating Engineering, Saratov State Technical University Gagarin Yu.A.

Dmitry G. Sotnikov – post-graduate student of Industrial Heating Engineering, Saratov State Technical University Gagarin Yu.A.

Olga V. Afanaseva – Cand. Sci. (Techn.), Head of innovation and international communication department, Kazan State Power Engineering University.

Поступила в редакцию

5 сентября 2017 г.