

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНВЕРСИИ УГЛЯ В ГОРЮЧИЙ ГАЗ МЕТОДОМ TEXACO

Ильичев В.Ю.¹, Юрик Е.А.¹

¹ *Калужский филиал ФГОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Калуга, e-mail: patrol8@yandex.ru*

Россия располагает огромными запасами очень ценного полезного ископаемого – каменного угля. К сожалению, непосредственное его использование как в качестве топлива, так и в качестве сырья для химического производства сопряжено с рядом трудностей и недостатков. Среди них основными являются сложность транспортировки и большой объём вредных для окружающей среды выбросов при сжигании. Всё большее внимание в настоящее время уделяется процессу преобразования угля в горючий газообразный продукт, который более приспособлен для транспортировки и к тому же является незаменимым сырьём для химического производства.

В статье описывается последовательность моделирования процесса конверсии угля с применением одного из наиболее совершенных методов - Техасо. Математическое моделирование осуществляется с помощью современного программного продукта для исследования физико-химических процессов Aspen Plus, располагающего мощными средствами численного решения огромного количества уравнений, описывающих происходящие в газификаторе процессы. В программе создана технологическая схема процесса конверсии, отличающегося параллельно-последовательным протеканием большого числа химических реакций. Приведены примеры осуществления оптимизации параметров: максимизации энергетических характеристик получаемого газа и доли выхода ценного химического продукта – водорода. По результатам исследований сделаны обоснованные выводы и даны рекомендации по дальнейшему применению разработанной методики моделирования процесса конверсии угля в горючий газ.

Ключевые слова: каменный уголь, конверсия угля, газификация, метод Техасо, горючий газ, газификатор.

STUDY OF COAL TO COMBUSTIBLE GAS CONVERSION PROCESS BY TEXACO METHOD

Ilichev V.Y.¹, Yurik E.A.¹

¹ *Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, e-mail: patrol8@yandex.ru*

Russia has huge reserves of very valuable minerals - coal. Unfortunately, its direct use as both fuel and raw material for chemical production presents a number of difficulties and disadvantages. Among them, the main ones are the complexity of transportation and the large amount of environmentally harmful emissions from combustion. Increasing attention is now being paid to the process of converting coal into a combustible gaseous product, which is more suitable for transportation and is also an indispensable raw material for chemical production.

The paper describes the sequence of modelling the coal conversion process using one of the most advanced methods - Texaco. Mathematical modeling is carried out with the help of modern software product for research of physical and chemical processes Aspen Plus, which has powerful means of numerical solution of huge number of equations describing processes taking place in gasifier. By means of the program authors created a technological diagram of the conversion process, which is characterized by parallel-sequential progress of a large number of chemical reactions. Examples of optimization of parameters are given: maximization of energy characteristics of produced gas and fraction of yield of valuable chemical product - hydrogen. Based on the results of the studies, well-founded conclusions were drawn and recommendations were made for further application of the developed methodology of modeling the process of coal conversion to combustible gas.

Keywords: coal, coal conversion, gasification, Texaco method, combustible gas, gasifier.

Введение. Одним из основных видов топлив в России является каменный уголь [1]. К сожалению, экономически эффективное использование угля ограничено сложностью транспортировки на большие расстояния, поэтому он в основном сжигается в котлах на электростанциях, построенных вблизи мест его добычи. Из-за этого каменный уголь часто ошибочно считают низкосортным сырьём [2]. Однако, путём переработки из каменного угля можно получить ценные химические соединения, используемые при производстве промышленной продукции. Те же соединения можно получать из нефти или природного газа, но уголь имеет более низкую стоимость и наибольшие запасы в земной коре – с этой точки зрения он вне конкуренции.

Наиболее перспективными методами переработки каменного угля, позволяющим решить проблему транспортировки топлива, получить ценные углеводородные соединения и снизить загрязнение окружающей среды от непосредственного сжигания угля [3], являются методы преобразования (конверсии) угля в газообразные продукты – газификации угля [4].

Цель исследования. Целью исследования процесса конверсии угля является его оптимизация с точки зрения получения газообразного продукта, обладающего наилучшими свойствами. В данном случае наиболее ценными свойствами являются наибольшая теплота сгорания, наименьшее содержание смол, а также наибольшая производительность процесса и наибольший выход полезного продукта из используемого сырья.

Для достижения данной цели необходима разработка адекватной модели очень сложного физико-химического процесса газификации, позволяющей быстро получать точные результаты.

Материал и методы исследования. В данной работе рассмотрен метод конверсии Техасо, отличающийся наиболее высокой производительностью [5], при котором угольная пыль в смеси с водой и паром подаётся в поток кислорода, являющегося окислителем.

Зола отводится из газогенератора в виде расплавленного шлака и является безопасной и пригодной для захоронения. Получаемый газ состоит в-основном из водорода H_2 и оксида углерода CO .

Схема газификатора приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема газификатора.

Газификатор состоит из двух полостей – реактора и водного резервуара. Вначале получают суспензию, представляющую собой смесь воды с углем, размолотым в пыль с размером частиц менее 500 мкм. Эта смесь подаётся вместе с кислородом и паром в верхнюю полость газификатора - реактор. Здесь последовательно-параллельно протекают три процесса: пиролиз, сжигание летучих компонентов и собственно газификация угля. Для осуществления данных реакций в реакторе должны быть созданы высокое давление и температура (в исследуемом процессе они равны 24 атм и 1050 °С). В нижнюю полость газификатора подаётся вода, в которой растворяется и затем отводится сажа. На дне газификатора остаётся шлак.

Схема газификации по методу Техасо описывается в примерах из руководства к программе моделирования физико-химических процессов Aspen Plus [6].

В данной модели используются три блока анализа процессов: предварительного, окончательного и анализа на содержание серы. Предварительный анализ показывает весовое содержание следующих фракций угля: влаги, фиксированного углерода, летучих соединений и золы. Окончательный анализ даёт представление о составе угля: содержании золы, углерода, водорода, серы, азота и кислорода. Анализ на содержание серы позволяет разделить серу на пиритную, сульфатную и органическую.

В программе Aspen Plus последовательность протекания процессов моделируется с помощью взаимного соединения реакционных блоков. Модель метода Техасо, созданная в программе Aspen Plus, показана на рис. 2.

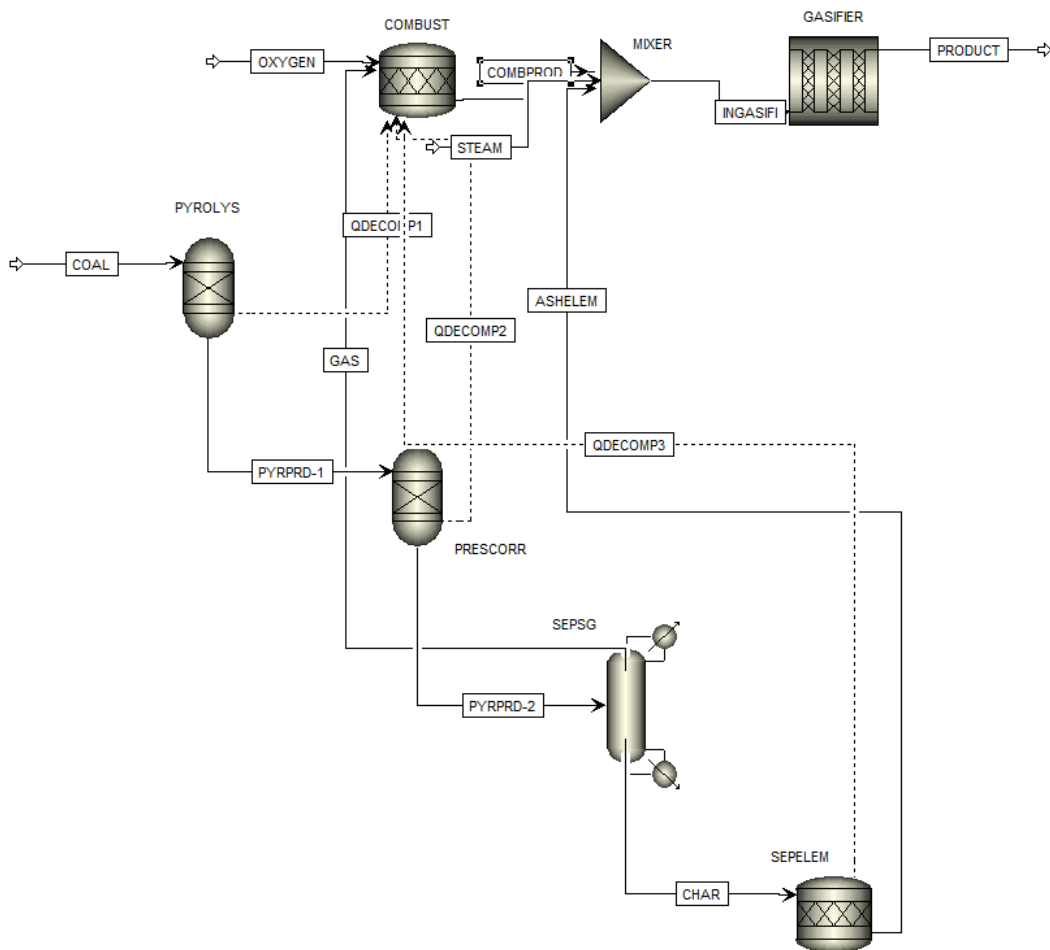


Рис. 2. Технологическая схема процесса конверсии угля по методу Техасо.

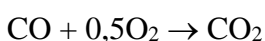
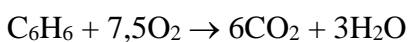
Как было отмечено ранее, при конверсии протекают три сложных физико-химических процесса: пиролиз, сжигание летучих соединений и газификация угля.

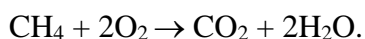
Пиролиз - процесс разделения каменного угля на летучие соединения и осадок, который состоит из множества одновременно и последовательно протекающих реакций, и условно записывается следующим уравнением:

Уголь = Осадок + CO + H₂ + H₂O + CO₂ + CH₄ + H₂S + N₂ + C₆H₆ (сажа).

На рис. 2 уголь COAL поступает в пиролизный реактор PYROLYS, моделирующий протекание реакций при атмосферном давлении. Затем количество и свойства каждого продукта пересчитываются в реакторе PRESCORR, исходя из реального давления в газификаторе, равного 24 атм.

Сгорание летучих соединений в смеси с кислородом моделируется в реакторе COMBUST. В нём протекают следующие химические реакции:





Последний моделируемый процесс, газификация, протекает в реакторе GASIFIER. Выходом процесса конверсии является продукт PRODUCT - синтез-газ.

Для более точного описания метода Техасо используются дополнительные элементы технологической схемы. Сепаратор SEPSG предназначен для разделения газа и твёрдого осадка. В реакторе SEPELEM осадок разделяется на элементарные составляющие (C, H₂, O₂, N₂, S) для описания реакций в газификаторе. Смеситель MIXER предназначен для смешивания веществ перед газификатором.

Разработанная модель позволила произвести следующие исследования процесса конверсии конкретного сорта каменного угля методом Техасо:

1. оценить влияние расхода впрыскиваемого водяного пара на процентное содержание в получаемом продукте водорода, который можно использовать в химических производствах или в качестве топлива;
2. оценить влияние расхода подводимого кислорода на теплотворную способность продукта, с целью повышения его энергетической ценности.

Исходные данные по элементному составу конвертируемого каменного угля и параметры процесса газификации по методу Техасо взяты из модели [6].

Теплотворная способность продукта оценивалась по процентному содержанию компонентов получаемого газа CO, H₂, CH₄, H₂S [7].

Результаты. В табл. 1 частично представлены результаты расчёта влияния расхода впрыскиваемого водяного пара на молярные доли компонентов полученного синтез-газа, а на рис. 3 – на процентное содержания водорода в синтез-газе.

Табл. 1. Влияние расхода впрыскиваемого водяного пара, г/сек, на молярную долю компонентов получаемого газа.

Компоненты синтез-газа	25	26	27	28	29	30	31	32	33
CO	0,509673	0,504095	0,498581	0,49313	0,487745	0,482425	0,477171	0,471983	0,466861
H ₂	0,370641	0,370738	0,370802	0,370835	0,370836	0,370808	0,370751	0,370666	0,370554
CO ₂	0,042774	0,044802	0,0468	0,048765	0,050698	0,052598	0,054465	0,056298	0,058097
H ₂ O	0,069818	0,073393	0,076964	0,08053	0,084088	0,08764	0,091183	0,094719	0,098246
H ₂ S	0,003242	0,003174	0,00311	0,003049	0,002992	0,002937	0,002884	0,002834	0,002786
N ₂	0,002299	0,002284	0,002268	0,002254	0,002239	0,002224	0,00221	0,002196	0,002183
CH ₄	0,001553	0,001513	0,001475	0,001438	0,001403	0,001369	0,001336	0,001304	0,001274

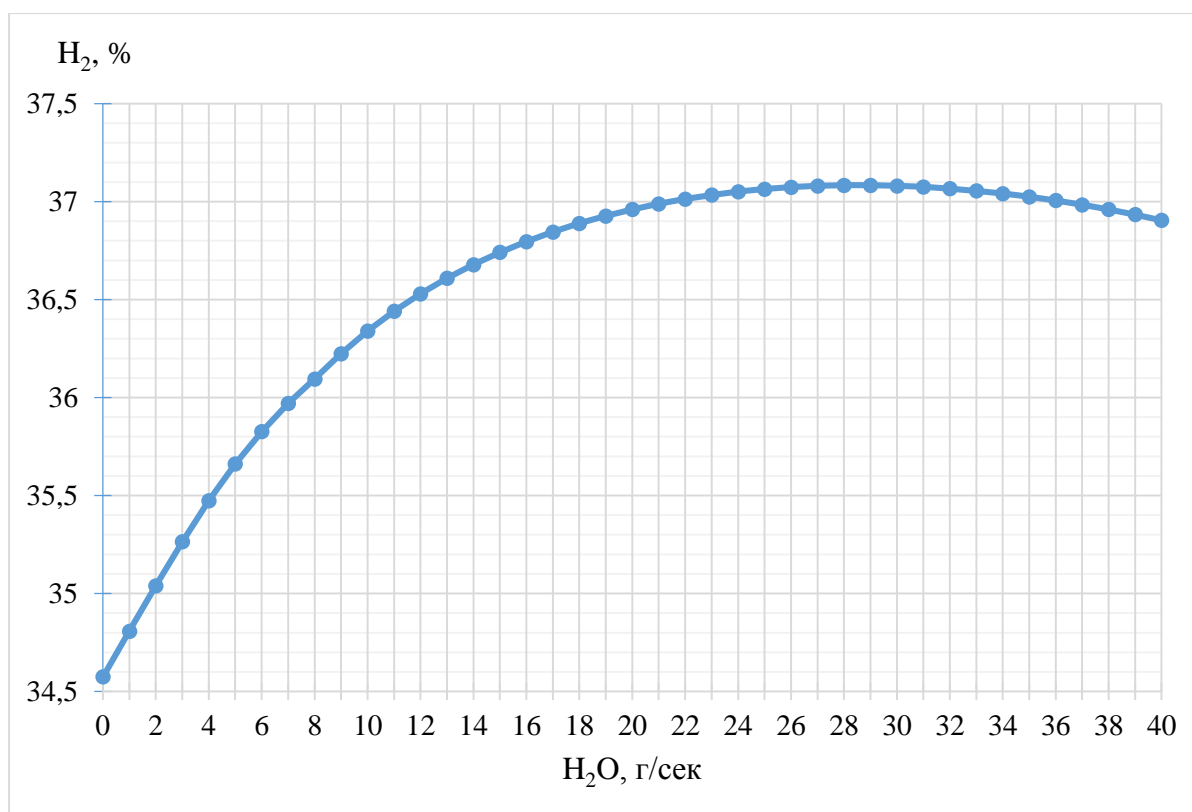


Рис. 3. Зависимость процентного выхода водорода от расхода водяного пара.

В табл. 2 и на рис. 4 представлены результаты расчёта влияния массового расхода подводимого кислорода на молярные доли компонентов и на теплотворную способность синтез-газа.

Табл. 2. Влияние расхода подводимого кислорода, г/сек, на молярные доли компонентов получаемого газа и на его теплотворную способность.

Компоненты синтез-газа	63	64	65	66	67	68	69	70	71
CO	0,5309	0,5365	0,5415	0,5459	0,5495	0,5502	0,5488	0,5475	0,5462
H ₂	0,3791	0,3763	0,3734	0,3703	0,3670	0,3623	0,3564	0,3504	0,3442
CO ₂	0,0324	0,0311	0,0300	0,0292	0,0286	0,0292	0,0306	0,0319	0,0331
H ₂ O	0,0493	0,0479	0,0469	0,0465	0,0469	0,0504	0,0566	0,0628	0,0691
H ₂ S	0,0037	0,0037	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0039
N ₂	0,0025	0,0025	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024
CH ₄	0,0021	0,0021	0,0020	0,0019	0,0018	0,0016	0,0014	0,0013	0,0011
теплотв. спос., ккал/нм ³	2616	2625	2633	2638	2639	2628	2607	2586	2565

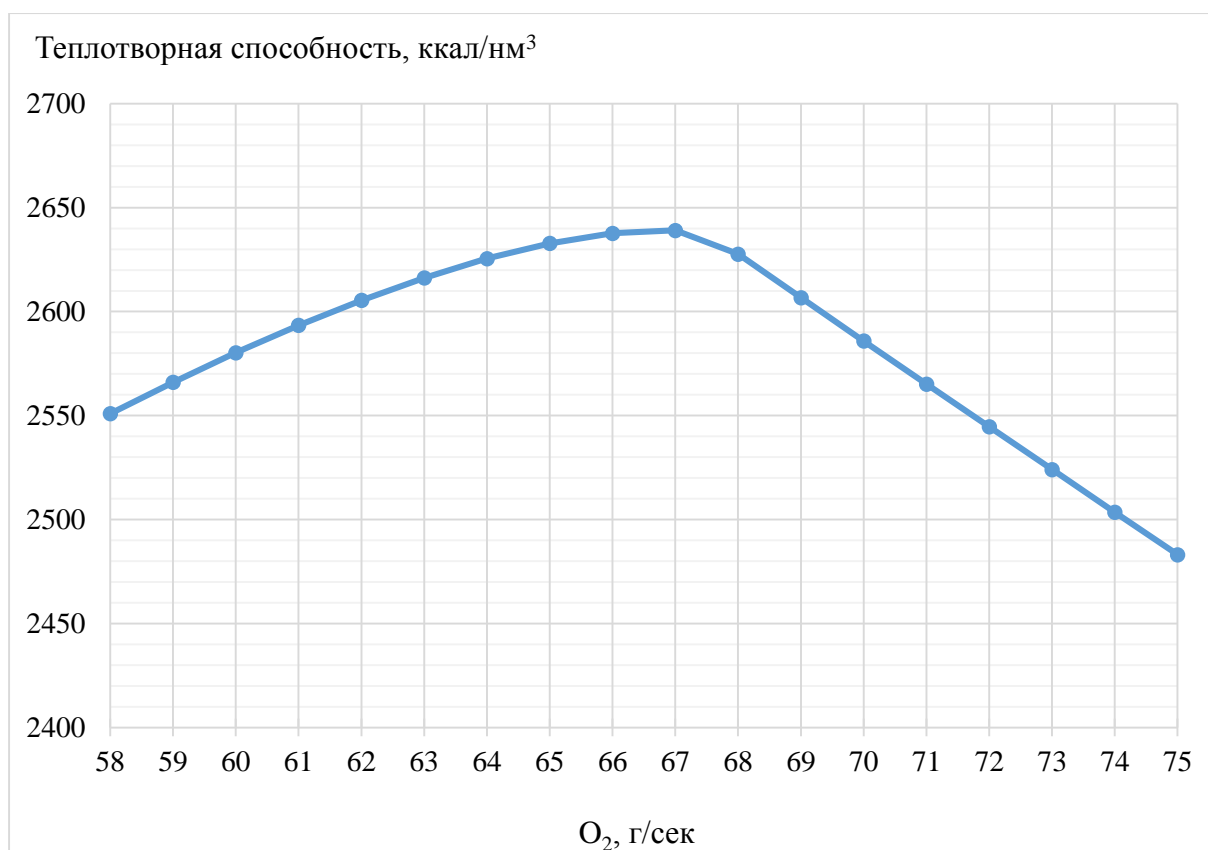


Рис. 4. Зависимость теплотворной способности синтез-газа от расхода подводимого кислорода.

Обсуждение. Результаты изучения характеристик технологического процесса конверсии угля Техасо, начальные условия которого заданы в [6], позволили определить, что:

1. Наибольший процентный выход водорода (37,08 %) наблюдается при впрыске водяного пара в количестве 29 г/сек (табл. 1 и рис. 3).
2. Наибольшей теплотворной способностью (2639 ккал/нм³) обладает газ, полученный при массовом расходе кислорода 67 г/сек (табл. 2 и рис. 4).

Тем же путём возможно вычислить оптимальные расходы поступающих компонентов при любых других начальных условиях.

Заключение. Одним из методов повышения эффективности использования ископаемого каменного угля является процесс его конверсии [8]. Он позволяет получить экологически более чистое топливо, чем сам уголь, а также извлекать ценные компоненты и соединения для использования в химической промышленности.

Процесс создания модели технологических процессов газификации удобно выполнять с помощью программы Aspen Plus, позволяющей исследовать влияние состава оборудования, его конструктивных особенностей, характеристик процесса, состава и расходов реагирующих веществ на состав, выход и энергетические характеристики получаемого продукта.

По конкретным исходным данным для характеристик сырья, параметров процесса и состава оборудования произведён процесс оптимизации расходов вводимых компонентов с целью получения наилучших характеристик продукта.

Продемонстрированную методику в дальнейшем можно использовать и для других целей оптимизации – например, для подбора давлений, температур, длительности процессов в реакторах и т.д. с целью наибольшего выхода определённых компонентов продукта и для уменьшения вредных для экологии веществ в составе шлака. При этом возможно рассматривать и сравнивать любые существующие схемы технологических процессов конверсии угля.

Список литературы

1. Цибульский С.А. Современные технологии газификации угля в промышленной энергетике. // Современные техника и технологии. Сборник докладов XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. 2014. С. 189-190.
2. Бурнусов М.Э., Портнов Д.А. Экспериментальное исследование конверсии угля в горючий газ. // Введение в энергетику. Сборник материалов II Всероссийской (с международным участием) молодежной научно-практической конференции. 2016. С. 8.
3. Тасейко О.В., Михайлютина С.В., Спицына Т.П., Леженин А.А., Соколов В.С., Хлебопрос Р.Г. Экологическая эффективность технологии газификации угля на примере Красноярской агломерации. [Электронный ресурс]. URL: modernproblems.org.ru/ecology/24-hlebopros8.html. (дата обращения: 16.04.2020).
4. Гафуров Н.М., Хисматуллин Р.Ф. Перспективы использования энергоблоков с внутрицикловой газификацией угля. // Инновационная наука. 2016. № 5-2 (17). С. 62-63.
5. Алешина А.С., Сергеев В.В. Газификация твердого топлива: учебное пособие. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2010. 202 с.
6. Wen C.Y., Chaung T.Z. Aspen Plus. Model for Entrained Flow Coal Gasifier. Aspen Technology, Inc. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 2014. no. 18: P. 684-695.
7. Тумэнбаяр А., Тунгалагтамир Б. Результаты использования программы Aspen Plus для моделирования газификации угля. // Автоматика и программная инженерия. 2017. № 4 (22). С. 29-34.
8. Саламов А.А. Паротурбинный цикл с газификацией угля. // Энергетика за рубежом. 2011. № 1. С. 15-27.