РАЗДЕЛ XVI. ЭНЕРГЕТИКА

Ермагамбет Б.Т.¹, Касенова Ж.М.¹, Мартемьянов С.М.², Бухаркин А.А.²
Испытания электрофизического нагрева угля на открытом участке пласта
угольного разреза «Богатырь»

¹ТОО «Институт химии угля и технологии»
(Казахстан, Нур-Султан)

²Национальный Исследовательский Томский Политехнический университет
(Россия, Томск)

doi: 10.18411/lj-08-2020-65

ids: lj-08-2020-65

Аннотация

Нагрев подземного угольного пласта электрическим током может быть использован для внутрипластовой пиролизической конверсии угля в горючие газы и смолы. Для проектирования электрооборудования для реализации этой технологии необходимо знать динамику изменения электрических параметров пласта на разных стадиях нагрева. Известно, что сопротивление межэлектродного участка снижается по мере нагрева. На начальной стадии это сопротивление велико и составляет десятки-сотни килоом на метр длины. В связи с этим, реализация нагрева затруднительна, поскольку требуется высокое напряжение для выделения в подземном участке большой мощности. По мере прогрева сопротивление межэлектродного участка снижается до десятков Ом, что с технической стороны облегчает проведение нагрева. Таким образом, интерес представляет динамика сопротивления межэлектродного участка во времени при известной величине вводимой мощности. В статье описаны результаты испытания опытного электрооборудования на открытом участке угольного пласта при межэлектродном расстоянии 1 м.

Ключевые слова: уголь, синтез газ, карбонизация, нагрев, конверсия

Abstract

The heating of an underground coal seam by electric current can be used for in-situ pyrolytic conversion of coal into combustible gases and resins. For the design of electrical equipment for the implementation of this technology, it is necessary to understand the dynamics of changes in the electrical parameters in the formation at different stages of heating. It is known that the resistance of the interelectrode section reduces the heating. At the initial stage, this resistance is large and amounts to tend to hundreds of kilo-ohms per meter of length. In this regard, the implementation of heating is difficult, since high voltage is required to allocate high power in the underground section.

As it warms up, the resistance of the interelectrode section reduces to tend of Ohms, which from the technical side facilitates heating. Thus, the dynamics of the resistance of the interelectrode section in time at a known value of the input power is of interest. The article shows the results of testing experimental electrical equipment in an open area of a coal seam at an interelectrode distance of 1 m.

Keywords: coal, synthesis gas, carbonization, heating, conversion

Настоящая работа посвящена способу подземного пиролиза ископаемых топлив путем их электрического нагрева. Способ предусматривает несколько этапов. При подготовке площадки должны быть пробурены две скважины с поверхности земли до нагреваемого участка пласта. Далее в скважину погружаются электроды, подключенные к наземному мощному электрооборудованию. На первом этапе электрического воздействия на пласт к электродам прикладывается высокое напряжение промышленной частоты, под действием которого через некоторое время

образуется канал электротеплового пробоя. Далее на этапе основного нагрева этот канал используется в качестве резистивного нагревательного элемента [1].

По сравнению с традиционным способом подземной газификации углей, где горючий газ получают путем неполного подземного окисления угля [2], пиролизическая газификация дает более высококалорийный газ, что существенно расширяет возможности его применения. Полученный в наших лабораторных исследованиях газ имел теплотворную способность 12-16 МДж/м³ [3]. При дутьевой газификации производимый газ содержит азот и диоксид углерода в качестве балластных компонентов, в результате его калорийность составляет 4-8 МДж/м³.

Для подземной пиролизической газификации твердых ископаемых топлив предложен ряд способов. Подход, использованный компанией Shell, заключается в нагреве подземного пласта с помощью электрических нагревателей, погружаемых в скважины [4]. Однако в данном случае прогрев окрестности скважины происходит весьма медленно вследствие низкой теплопроводности породы. Для прогрева большого объема породы требуется густая сетка из скважин, расположенных на расстоянии в несколько метров друг от друга. Предлагаемый нами подход позволяет прогреть больший объем породы с помощью меньшего количества скважин [5].

Способ, использованный компанией ExxonMobil, использует две скважины, между которыми необходимо осуществить сбойку на уровне подземного пласта. Сбойка производится, как правило, с помощью гидроразрыва. Пространство сбойки заполняется с помощью гранулированного электропроводного материала. Далее в скважинах размещают электроды и пропускают ток. Электропроводный материал при этом используется в качестве электрического нагревательного элемента [6].

Предлагаемый нами способ близок к предыдущему, однако исключает трудоемкие операции выполнения сбойки и наполнения ее электропроводным материалом. Согласно предлагаемому способу, с поверхности земли до пласта ископаемого топлива бурятся две скважины, в которые погружаются электроды (рисунок 1). Однако пропускать электрический ток непосредственно через угольный пласт не удастся вследствие высокого электрического сопротивления, составляющего 10^{10} Ом·см и более [7,8,9]. По этой причине к электродам на первом этапе прикладывается высокое напряжение. Однако чтобы произвести непосредственный электропробой межэлектродного расстояния, потребуется весьма высокая напряженность электрического поля в 1-20 кВ/см [10]. При такой напряженности пробой 10 метров потребует напряжение в 1 МВ, что в полевых условиях реализовать не представляется возможным. В такой ситуации целесообразно использовать электротепловой пробой, который происходит при напряжении в десятки-сотни раз меньше [11,12]. Для этого, однако, требуется более высокая мощность оборудования и большее количество времени.

Рисунок 1 – Схема размещения электродов: 1 – наземное электрооборудование; 2, 3 – система отбора газа; 4 – электроды; 5 – смежные породы; 6 – пласт твердого топлива; 7 – скважины; 8 – соединительные провода.

Динамика электрических параметров межэлектродного участка

Известно, что сопротивление межэлектродного участка снижается по мере нагрева. На начальной стадии нагрева сопротивление межэлектродного участка велико

и составляет десятки-сотни килоом на метр длины. В связи с этим, реализация нагрева затруднительна, поскольку требуется высокое напряжение для выделения в подземном участке большой мощности. По мере прогрева сопротивление межэлектродного участка снижается до десятков Ом, что с технической стороны облегчает проведение нагрева. Нагрев межэлектродного участка производился в несколько этапов. На первом этапе нагрев производился в течение 233 минут. Мощность, требуемая для нагрева на начальном этапе, выбиралась исходя из проведенных ранее лабораторных исследований, и составляла 1-5 кВт на 1 м межэлектродного расстояния. Диаграммы напряжения и тока на первом этапе нагрева показаны на рисунке 3. На этом этапе нагрев производился с выхода трансформатора промежуточного звена (рисунок 2), поскольку сопротивление межэлектродного участка требовало для нагрева напряжение в единицы киловольт.

При включении напряжение плавно увеличивалось под контролем выделяемой мощности. В течение первого часа нагрева сопротивление межэлектродного участка колебалось в диапазоне 1-4 кОм. Далее сопротивление установилось в диапазоне 1 кОм и практически не менялось до конца этого этапа нагрева. Вводимая величина мощности на этом этапе поддерживалась ~6 кВт, что, согласно расчетам и лабораторным исследованиям, достаточно для постепенного нагрева межэлектродного участка до температуры термодеструкции угля.

Рисунок 3 – Диаграммы электрических параметров во времени – напряжение (а), ток (б), мощность (в) и сопротивление (г). Первый этап

Средняя величина мощности на первом этапе нагрева составила 5,37 кВт, в межэлектродный участок было введено 20,85 кВт·ч электроэнергии. За этот интервал времени электросчетчик, включенный на входе установки, определил затраты электроэнергии в 28,2 кВт·ч. Таким образом, на этом этапе работы КПД установки составил 74% процента, что является неплохим показателем с учетом исследовательского характера установки. Наличие потерь в 26% обусловлено, главным образом, потерями в регуляторе РОТМ-250/0,5, что вызвано принципом регулирования напряжения за счет перемещения короткозамкнутого витка вдоль основного ярма магнитопровода.

После завершения данного этапа было произведено снятие проходного изолятора с превенторов для проверки состояния электродов и скважины. В результате обнаружено следующее:

- электроды имеют температуру выше 100°C. В нижней части электрода имеется нагар, свидетельствующий о протекании тока в месте контакта с углем, что говорит о правильной работе электродной системы;
- забой скважины имеет температуру около 100°C. Очевидно присутствие в скважинах значительного количества влаги;
- из скважины выходит газ, содержащий большое количество водяного пара, а также газы пиролизического разложения угля, что зарегистрировано с помощью портативного газоанализатора;
- на внутренней части изолятора имеется желтовато-коричневый налет, образованный оседанием аэрозольных частиц сажи и смолы пиролизического разложения угля.

Таким образом, очевидно начало нагрева и пиролизического разложения угля.

Второй этап нагрева начали через 15 часов после остановки нагрева на первом этапе. На втором этапе продолжительность нагрева составила 140 минут. Сопротивление межэлектродного участка на этом этапе колебалось в диапазоне 650-800 Ом и существенно не менялось. Вводимая мощность поддерживалась в диапазоне 5-6 кВт. Средняя величина мощности составила 5,68 кВт, затраченная электроэнергия – 13,25 кВт·ч.

Третий этап нагрева был начат через 1,5 часа после остановки нагрева на втором этапе. Диаграммы электрических параметров на третьем этапе нагрева приведены на рисунке 4.

Рисунок 4 – Диаграммы электрических параметров во времени – напряжение (а), ток (б), мощность (в) и сопротивление (г)

Продолжительность нагрева на третьем этапе составила 270 минут. Первые 3,5 часа этого этапа нагрева сопротивление межэлектродного участка колебалось в диапазоне 600-800 Ом и существенно не менялось. Однако через 220 минут после начала нагрева сопротивление лавинообразно снизилось до ~250 Ом. Аналогичная картина, ранее наблюдавшаяся в лабораторных экспериментах, свидетельствует о постепенном формировании токопроводящего канала между электродами. Снижение сопротивления в ~2,5 раза, наступившее в течение нескольких часов после начала нагрева, согласуется с результатами лабораторных исследований и позволяет предположить, что такая тенденция, скорее всего, сохранится. Таким образом, при дальнейшем нагреве в течение нескольких часов, сопротивление снизится в разы, и так далее.

Средняя мощность на третьем этапе нагрева составила 6,02 кВт, затраченная электроэнергия – 27,1 кВт·ч. За второй и третий этап нагрева электросчетчик определил 56,8 кВт·ч потребленной электроэнергии. Таким образом, КПД установки на этом этапе составил 71%, что близко к аналогичной величине на первом этапе нагрева. На рисунке 5 показано инфракрасное изображение превентора, зарегистрированное тепловизором Flir E50.

Рисунок 5 – Видимое (а) и инфракрасное (б) изображение превентора

В нижней части превентора виден нагрев, температура достигла 25°C при температуре окружающей среды 7°C. Оба превентора нагрелись примерно одинаково.

После окончания третьего этапа нагрева было произведено снятие проходных изоляторов для контроля состояния скважин и электродов. Обнаружено следующее:

- электроды имеют температуру 120-140°C. В нижней части электрода имеется нагар, свидетельствующий о протекании тока в месте контакта с углем, что говорит о правильной работе электродной системы;
- забой скважины имеет температуру в 120-140°C. Очевидно присутствие в скважинах значительного количества влаги. Присутствие влаги обусловлено, скорее всего, насыщением угля водой из бетона;
- из скважины выходит газ, содержащий большое количество водяного пара.

Выходящий из скважины газ был проанализирован газоанализатором Borsean K-600, способным определять в газе присутствие CO, CO₂ и CH₄. Газоанализатор показал присутствие в газе указанных компонент в концентрации выше верхнего предела: CO>0,1%, CO₂>5%, CH₄>5%.

1. Lopatin V.V., Martemyanov S.M., Bukharkin A.A., Koryashov I.A. Underground pyrolytic conversion of oil shale // Proceedings of the 8th international forum on strategic technology 2013 (IFOST2013), Vol. 1, P.547-549, june 28 – july 1, Ulaanbaatar
2. Perkins, Greg. Underground coal gasification–Part I: Field demonstrations and process performance. Progress in Energy and Combustion Science 67 (2018): 158-187
3. Martemyanov S.M., Bukharkin A.A., Koryashov I.A., Ivanov A.A. Composition of pyrolysis gas from oil shale at various stages of heating // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. - Vol. 830. – [012008, 5 p.]
4. Vinegar, Harold J., et al. "In situ recovery from a hydrocarbon containing formation." U.S. PatentNo. 7,798,221. 21 Sep. 2010.
5. Knyazeva A.G., Maslov A.L., Martemyanov S.M. A two-phase model of shale pirolysis // Fuel 228 (2018). – 132-139
6. Hoda, Nazish, et al. "Numerical modeling of ExxonMobil's Electrofrac field experiment at Colony Mine." Oral presentation of paper given at the 30th Oil Shale Symposium, Denver, Colorado. 2010.
7. Duba, Alfred G. "Electrical conductivity of coal and coal char." Fuel 56.4 (1977): 441-443.
8. Ozaki, Jun-ichi, et al. "Carbonization of iron-treated Loy Yang coal." Fuel 78.4 (1999): 489-499.
9. Dindi, Hasan, Xiao-hongBai, and William B. Krantz. "Thermal and electrical property measurements for coal." Fuel 68.2 (1989): 185-192.
10. Yan, Fazhi, et al. "Using high-voltage electrical pulses to crush coal in an air environment: An experimental study." Powder technology 298 (2016): 50-56.
11. Zhu, Chuanjie, et al. "Effect of high-voltage thermal breakdown on pore characteristics of coal." InternationalJournalofMiningScienceandTechnology 27.6 (2017): 1051-1055.
12. Yan, Fazhi, et al. "Structural evolution characteristics of middle–high rank coal samples subjected to high-voltage electrical pulse." Energy&Fuels 32.3 (2018): 3263-3271.