

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПЫТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПОДЗЕМНОГО НАГРЕВА УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

**Авторы:** Ермагамбет Б.Т., Мартемьянов С.М., Касенова Ж.М., Бухаркин А.А., Нургалиев Н.У.

**Организация:** ТОО «Институт химии угля и технологии», г. Нур-Султан, Казахстан.  
Национальный Исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск,  
Россия

В последнее время существенно растет внимание к технологиям эффективной переработки твердых ископаемых топлив – каменных и бурых углей, горючих сланцев. На роль одной из наиболее эффективных технологий переработки может претендовать подземная конверсия. Она не требует извлечения породы на поверхность, а также последующей утилизации шлака.

Применение электроразрядных технологий может дать новый виток развития методов подземной конверсии. Нами ранее обнаружено, что электроразрядные процессы, такие как частичные разряды и вызываемый ими электрический триинг могут приводить к пробоям некоторых видов твердых топлив при относительно невысоких напряжениях. Этот эффект может быть использован для электрического пробоя и последующего нагрева участка подземного пласта путем использования канала пробоя в качестве резистивного нагревательного элемента [1].

Для того, чтобы изучить применимость углей Казахстана для конверсии таким способом, нами были исследованы характеристики частичных разрядов и пробоя в углях, взятых с угольных разрезов Богатырь, Сарыадыр и Майкубе. Частичные разряды (ЧР) возникают в диэлектриках под действием приложенного внешнего высокого напряжения. ЧР представляет собой неполный пробой диэлектрика, приводящий к замыканию разрядным каналом части межэлектродного расстояния. Причиной возникновения частичных разрядов является неравномерное распределение электрического поля внутри материала. Для неоднородного вещества, имеющего включения из разных материалов, напряженность в межэлектродном пространстве будет распределяться обратно пропорционально диэлектрической проницаемости материалов [2]:

$$\frac{E_D}{E_B} = \frac{\varepsilon_B}{\varepsilon_D},$$

где  $E_D$ ,  $E_B$  – напряженность в основной части диэлектрика и включении соответственно,  $\varepsilon_D$ ,  $\varepsilon_B$  – диэлектрическая проницаемость основной части диэлектрика и включения соответственно. Таким образом, наибольшая напряженность поля будет на элементах, имеющих наименьшую диэлектрическую проницаемость. Как правило, таковыми

являются газовые включения и поры. Причем, напряженность на них будет тем больше, чем выше диэлектрическая проницаемость остальной части диэлектрика.

В зависимости от материала диэлектрика и его молекулярной структуры дендриты могут быть проводящими и непроводящими [3,4]. В случае непроводящих дендритов триинг происходит вследствие повышенной напряженности внутри самого дендрита. Основная часть ЧР сосредоточена в области основания дендрита. ЧР имеют сравнительно большой кажущийся заряд, который возрастает при удлинении дендрита. Удлинение структуры в этом случае происходит тогда, когда стримеры разряда достигают острий дендрита. При этом образуется полая канальная структура с диэлектрическими стенками. В этом случае интенсивность частичных разрядов ослабевает по мере роста и ветвления структуры. Канальная структура в этом случае покрыта низкоомным слоем продуктов термодеструкции диэлектрика [3].

На основании проведенных ранее исследований экспериментов по пробоям твердых топлив, нами сделаны следующие наблюдения особенностей электрической деградации этого материала. При неизменной величине приложенного напряжения рост дендритов происходит некоторое время, после которого интенсивность частичных разрядов снижается. При повышении напряжения интенсивность ЧР вновь повышается и продолжается некоторое время, после чего снова снижается. Такое поведение связано с тем, что изменение напряжения на электродах будет влиять на величину поля, сконцентрированного на острие дендрита. В фундаментальной работе [5] представлена формула, описывающая максимальная напряженность поля на острие электрода в электродной системе острие-плоскость:

$$E = \frac{2V}{r \ln(1 + \frac{4d}{r})} \quad (1)$$

Благодаря этому механизму напряжение триингового пробоя существенно ниже, чем напряжение мгновенного электрического пробоя на постоянном или импульсном напряжении. Можно предположить, что максимальная напряженность на головке дендрита велика и при росте дендрита поддерживается на том постоянном уровне, который достаточен для пробоя окружающих участков и дальнейшего удлинения дендрита.

Внутрипластовая конверсия твердых топлив предполагает нагрев породы непосредственно в условиях залегания. Для лабораторных исследований производилась имитация условий подземного пласта для образца твердого топлива. Имитировались такие критерии подобия, как пластовое давление и напряженность электрического поля. Структурная схема установки показана на рисунке 1.



Рисунок 1 – Структурная схема установки

Методика экспериментов заключалась в следующем. Образец с установленными электродами и термопарами помещался в камеру. Электроды и термопары соединяются проводниками с электрическими вводами камеры, которые изолированы от корпуса камеры керамическими изоляционными трубками. Вводы герметизированы с помощью грибкового уплотнения и обеспечивают герметичность камеры. После герметизации и вакуумирования, камера заполнялась азотом до рабочего давления, которое в эксперименте составляло  $2 \text{ кгс/см}^2$  и поддерживалось постоянным. Снаружи к электрическим вводам камеры подключались выводы электрооборудования установки. Путем подачи высокого напряжения сначала производился пробой образца. Далее установка переключается с высоковольтного на силовоточный режим работы, и производится нагрев образца пропусканием тока через канал пробоа. По мере нагрева выделяющийся газ смешивается с азотом. Для поддержания постоянного давления в камере выделение газа компенсируется сбросом избыточного давления через газовый ввод камеры. Таким образом, выделяющийся пиролизный газ постепенно замещает азот. В конце эксперимента производился отбор пробы газа из камеры для анализа. Отбор проб производился через прямой шланг, соединяющий камеру и хроматограф. Мощность нагрева в течение всего времени нагрева составляла  $\sim 600 \text{ Вт}$ . На рисунке 2 приведены зависимости температуры в измеряемых точках в зависимости от времени нагрева для образца угля Богатырь. Термограммы остальных образцов идентичны.

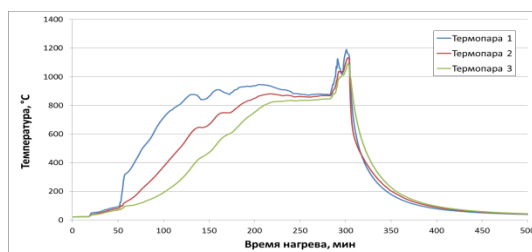


Рисунок 2 – Зависимости температуры от времени нагрева

Результаты анализа и калорийность полученного газа приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сводные данные по физическому моделированию подземного нагрева углей

| Параметры | Образец  |         |          |          |
|-----------|----------|---------|----------|----------|
|           | Богатырь | Майкубе | Сарыадыр | Сарыадыр |

|                                                             |       |       | (надежный) | (пятиметровый) |
|-------------------------------------------------------------|-------|-------|------------|----------------|
| Исходная масса образца, кг                                  | 5,590 | 5,067 | 4,199      | 4,316          |
| Масса после нагрева, кг                                     | 5,022 | 4,155 | 3,993      | 3,842          |
| Потеря массы, г                                             | 568   | 912   | 206        | 474            |
| Объем газа, м <sup>3</sup>                                  | 0,764 | 1,066 | 0,175      | 0,432          |
| Средняя молярная масса газа, г/моль                         | 7,65  | 10,85 | 9,34       | 9,09           |
| Удельная теплотворная способность газа, МДж/м <sup>3</sup>  | 13,89 | 11,93 | 14,18      | 19,16          |
| Удельная теплотворная способность газа, ккал/м <sup>3</sup> | 3320  | 2851  | 3389       | 4577           |
| Расчетная масса газа, г                                     | 261   | 516   | 73         | 175            |
| Расчетная масса жидких продуктов, г                         | 307   | 396   | 133        | 299            |
| Электроэнергия, затраченная на нагрев, кВт·ч                | 4,54  | 1,94  | 0,78       | 3,39           |

#### Выводы.

Впервые проведены экспериментальные работы по физическому моделированию подземного нагрева для исследуемых углей месторождения Сарыадыр пласт (Надежный и Пятиметровый), Майкубе, Богатырь по конверсии угля в газообразные продукты: электротепловой триинг → электротепловой пробой → нагрев электрическим током → пиролиз → газ. В результате из исследуемых углей был получен синтез газ с высоким содержанием горючих компонентов: H<sub>2</sub> – 64-75%, CO – 9,9-21,35%, CH<sub>4</sub> – 4,81-10,8% и высокой теплотворной способностью – 12-16 МДж/м<sup>3</sup>.

#### Литература:

- 1 Bukharkin A.A., Lopatin V.V., Martemyanov S.M., Koryashov I.A. Electrical discharge phenomena application for solid fossil fuels in-situ conversion // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. - Vol. 552. – [012012, 4 p.].
- 2 Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия. 1979. – 224 с.
- 3 J V Champion and S J Dodd Simulation of partial discharges in conducting and non-conducting electrical tree structures // J. Phys. D: Appl. Phys. 34 (2001) 1235–1242.

- 4 Dodd S.J., Chalashkanov N.M., Fothergill J.C. Partial Discharge Patterns in Conducting and Non-Conducting Electrical Trees // 2010 International Conference on Solid Dielectrics, Potsdam, Germany, July 4-9, 2010.
- 5 Mason J. H. Breakdown of solid dielectrics in divergent fields //Proceedings of the IEE-Part C: Monographs. – 1955. – Т. 102. – №. 2. – С. 254-263.