

*к.т.н. Шульгин П.Н.,  
Заев В.В., Распопина В.В.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗОНЫ ГОРЕНИЯ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ

*Наведені методика та результати лабораторних досліджень розподілу температури у вигазованому просторі підземного газогенератора під час газифікації вугільного пласту.*

***Ключові слова:** газифікація, підземний газогенератор, високотемпературна зона, фізична модель, електрогідродинамічні аналогії, електропровідний папір.*

*Приведены методика и результаты лабораторных исследований распределения температуры в выгазованном пространстве подземного газогенератора при газификации угольного пласта.*

***Ключевые слова:** газификация, подземный газогенератор, высокотемпературная зона, электрогидродинамические аналогии, физическая модель, электропроводная бумага.*

В настоящее время значительно расширился интерес к технологии подземной газификации угольных пластов, о чем свидетельствуют сооруженные в последнее десятилетие станции ПГУ в Австралии, Китае, Канаде и многочисленные (более 50) проекты строительства новых станций. Существенным недостатком традиционных технологий являются значительные (до 30 – 50%) потери тепловой энергии горения пласта, которые идут на бесполезный разогрев вмещающих пород. Как показали исследования [1, 2], повысить эффективность термохимической переработки угольных пластов можно за счет утилизации тепловой энергии с помощью жидкого теплоносителя (перегретая вода), циркулирующего в высокотемпературной зоне подземного газогенератора по трубным ставам коллекторной системы. В этой связи определение размеров высокотемпературной зоны и распределения температуры с удалением от огневого забоя представляют актуальную задачу для определения технологических параметров трубного коллектора.

При сгорании угля в толще пород образуется высокотемпературное, наполненное генераторными газами пространство, причем размер

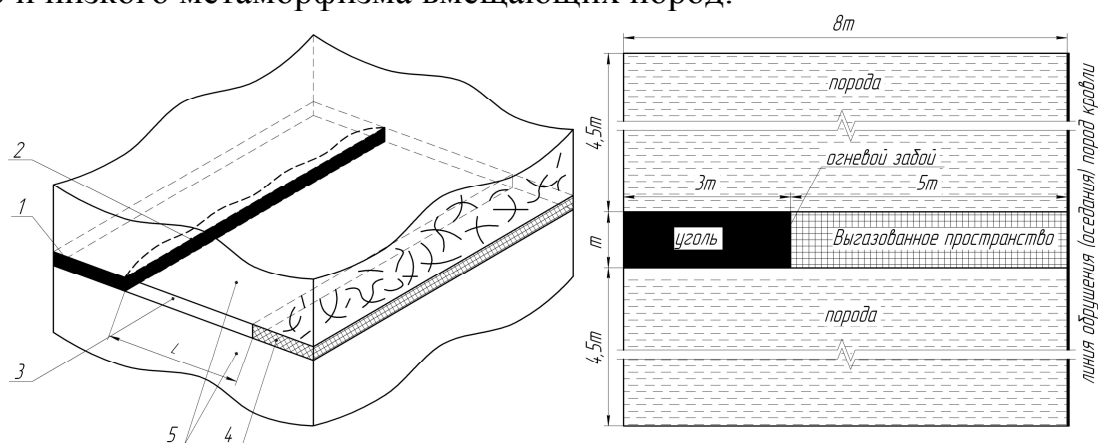
высокотемпературной зоны зависит от мощности и теплотворных характеристик угольного пласта, а также от физико-механических свойств вмещающих пород (их теплопроводности, нарушенности и т.д.).

В качестве объекта исследования принята модель, имитирующая процессы, происходящие в выгазованном пространстве, образовавшемся после выгорания угольного пласта, до момента обрушения (оседания) непосредственной кровли. Основными влияющими факторами на размер высокотемпературной зоны являются мощность угольного пласта и расстояние, на которое тепло будет распространяться в диффузионной области на обрабатываемом участке подземного газогенератора.

Задача моделирования состоит в определении размеров высокотемпературной зоны, в которой температура превышает  $300^{\circ}\text{C}$ , что обусловлено характеристиками гидропаровых турбин электрогенератора (требующих температуру теплоносителя  $120\text{--}250^{\circ}\text{C}$ ) с учетом возможных теплопотерь при транспортировании перегретой воды в трубном стае.

Ранее рассматривались различные задачи распределения тепла в угольном и породном массиве при подземной газификации пласта [3], однако вопросам распределения температуры в выгоревшем пространстве не уделялось должного внимания. Разработанная технология утилизации тепла привела к постановке новой задачи, направленной на установление размеров распространения высокотемпературной зоны в которой происходит нагрев теплоносителя.

На модели, представленной на рисунке 1, воспроизводим огневой забой угольного пласта и выгоревшее пространство длиной  $5\text{m}$  (где  $m$  – мощность пласта). Это расстояние было принято исходя из усредненных размеров зон обрушения кровли при выемке пластов в условиях среднего и низкого метаморфизма вмещающих пород.



1 – угольный пласт; 2 – огневой забой; 3 – выгазованное пространство; 4 – обрушенные породы; 5 – породный массив.

Рисунок 1 - Принятая модель, имитирующая распределение тепла в выгазованном пространстве подземного газогенератора

Принятая модель характеризуется важными параметрами, влияющими на распределение тепла в газовом пространстве – мощностью угольного пласта  $m$  и расстоянием до зоны обрушения непосредственной кровли. Для удобства, и наглядности отображения полученных результатов будем пользоваться приведенным расстоянием  $r$ , которое выражается отношением:

$$r = \frac{x}{m}, \quad (1)$$

где  $x$  – расстояние от очага горения до точки, в которой определяется температура, м ( $0 \leq x \leq L$ );

$m$  – мощность угольного пласта, м.

Принятая нами модель должна отвечать ряду условий, вытекающих из общей теории подобия. Модель должна представлять собой изучаемую область распространения тепла, в некотором масштабе, т.е. должно быть соблюдено геометрическое подобие.

Нами принят масштаб геометрического подобия

$$\alpha_L = \frac{L_H}{L_M} = 30, \quad (2)$$

где  $L_H, L_M$  - размеры исследуемого объекта в натуре и на модели.

При применении метода электрогидродинамических аналогий (ЭГДА) для однородной среды, условия подобия выполняются автоматически [4], т.е. имеет место автомодельность. Поэтому при моделировании тепловых процессов необходимо соблюдать только геометрическое подобие (2) и подобие граничных условий модели и природы, в этом случае будет соблюдено динамическое подобие:

$$C_{h,u} = \frac{t}{u}, \quad (3)$$

где  $t$  – температура в выгазованном (газовом) пространстве;

$u$  – электрический потенциал.

Приняв допущение, что газовая среда является однородной, а ее поведение после сгорания угольного пласта достаточно удовлетворительно характеризуется уравнениями гидродинамики [4], можно построить простую модель распределения температуры, изучить которую можно используя метод моделирования ЭГДА, основанном на аналогии

между стационарным движением электрического тока в проводящей среде и процессами, протекающими при передачи тепла от огневого забоя угольного пласта к продуктам газификации подземного газогенератора, заключающейся в том, что оба эти явления описываются одинаковыми дифференциальными уравнениями [4 - 6].

Для осуществления метода ЭГДА применяют различные электропроводные материалы: станиоль, электролиты жидкие и желеобразные (на агар-агаре), смесь мраморной крошки с графитом, электропроводные лаки и краски, электропроводный картон и бумагу и др. Наиболее распространенными материалами являются электролиты и электропроводная бумага (ЭПБ) [7].

В качестве материала модели нами принята электропроводная бумага, основные положения моделирования физических процессов при помощи которой изложены в работе [8].

Сущность метода ЭГДА с применением ЭПБ заключается в том, что на основании аналогии движения электрического тока в ЭПБ и реальными процессами, протекающими при распределении температур, оказывается возможным заменить определение температуры среды непосредственным измерением электрического потенциала на модели. Это оказывается возможным благодаря математической аналогии между стационарным движением электрического тока в проводящей среде и стационарным распространением тепла в газе.

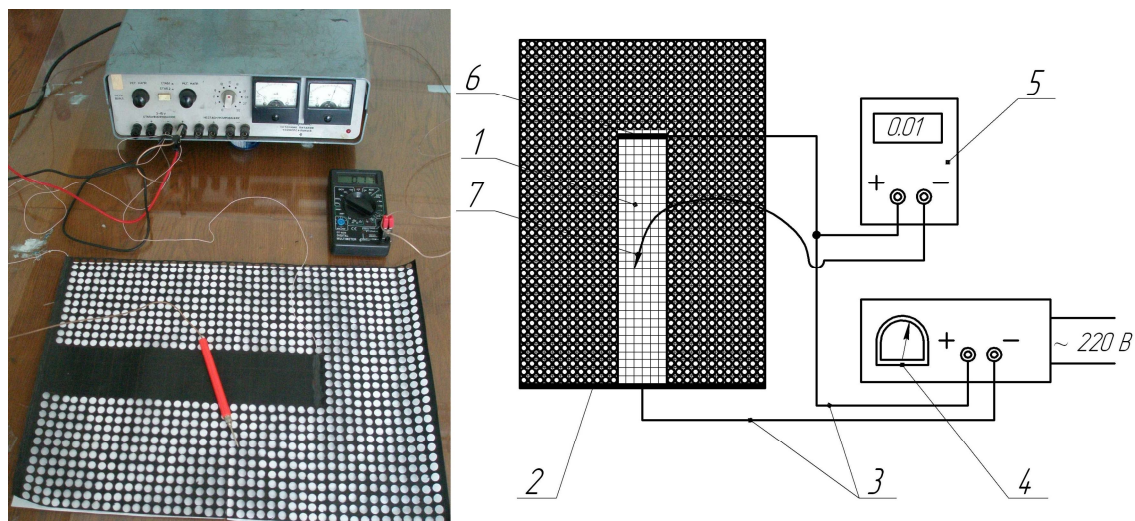
Для моделирования нами использовалась установка ЭГДА, разработанная на кафедре строительной геотехнологии и горных сооружений ДонГТУ представленная на рисунке 2. Прибор ЭГДА состоит из стабилизированного источника питания 4, который подключен к электросети напряжением 220 В. К выходным клеммам блока питания 4 соединительными проводами 3 подключен цифровой вольтметр 5 и модель из электропроводной бумаги 1 с шинами, имитирующую линию обрушения (оседания) пород 2 и огневой забой 6. К вольтметру 5 подключен щуп 7, которым на листе электропроводной бумаги определяют значения электрического потенциала. По ним впоследствии строят линии равных напряжений (эквипотенциальные линии). Модель изготавливали из электропроводной бумаги, соблюдая геометрическое подобие.

При моделировании необходимо обеспечить граничные условия, т.е. необходимо выполнить соотношения:

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0; \quad u = const. \quad (4)$$

Первое граничное условие обозначает, что на линиях симметрии модели градиент потенциала равен нулю, т.е. на границе электропро-

водной бумаги эквипотенциальные линии ей перпендикулярны. Второе граничное условие означает постоянство потенциала, т.е. имитирует поверхность, относительно которой эквипотенциальные линии параллельны, ее воспроизводим путем установки на модели шин и подачи на них заданного электрического потенциала.



1 – лист электропроводной бумаги; 2 – электропроводная шина;  
3 – соединительные провода; 4 – блок питания; 5 – цифровой вольтметр;  
6 – огневой забой; 7 – щуп.

Рисунок 2 - Установка ЭГДА

Учитывая принятое геометрическое подобие (2) из листа электропроводной бумаги вырезали модель размером 42,5x30см, на расстоянии 30 см от короткой стороны модели приклеивали (токопроводящим лаком) медный провод длиной 6 см, имитирующий очаг горения угольного пласта.

Важным показателем, влияющим на распространение тепла, является теплопроводность среды. При применении метода ЭГДА предполагается, что теплопроводность в натуре, соответствует сопротивлению в модели. Поэтому в зонах расположения вмещающих пород подземного газогенератора было необходимо увеличить (изменить) сопротивление электропроводной бумаги, т.к. теплопроводность пород значительно выше, чем теплопроводность генераторного газа. Увеличение сопротивления создавали путем вырезания участков электропроводной бумаги в зонах, соответствующих почве и кровле угольного пласта (рисунок 2).

Для удобства снятия показаний всю поверхность модели, используя токонепроводящий карандаш, разбивали сеткой с шагом в 10 мм, после этого на контуре модели наносили слой токопроводящего лака, имитирующего электропроводную шину (рисунок 2). Затем проводами

3 соединяли очаг горения 6 с клеммой положительного потенциала потенциометра прибора 4, а шину 2 – с клеммой его обратной полярности. После установки модели ее подключали к источнику тока и подавали стабилизированное напряжение 10 В на токопроводящие шины модели, тем самым создавали в модели поле электрического потенциала (аналога температурного поля). Для определения его распределения поисковой иглой снимали показания напряжения в углах сетки модели и по полученным данным с использованием программного комплекса «Mathcad» строили эквипотенциальные линии.

После обработки одной модели изготавливали следующую модель, размер которой оставался неизменным, но задавалась новая область выгазованного пространства, между огневым забоем и линией обрушения (оседания) пород кровли, оставляя мощность угольного пласта без изменения.

Таким образом, нами были промоделированы три соотношения расстояния до зоны обрушения пород к мощности угольного пласта ( $r = 2,5; 5,0; 8,5$ ).

Графики изменения температуры по мере удаления от линии огневого забоя приведены на рисунке 3.

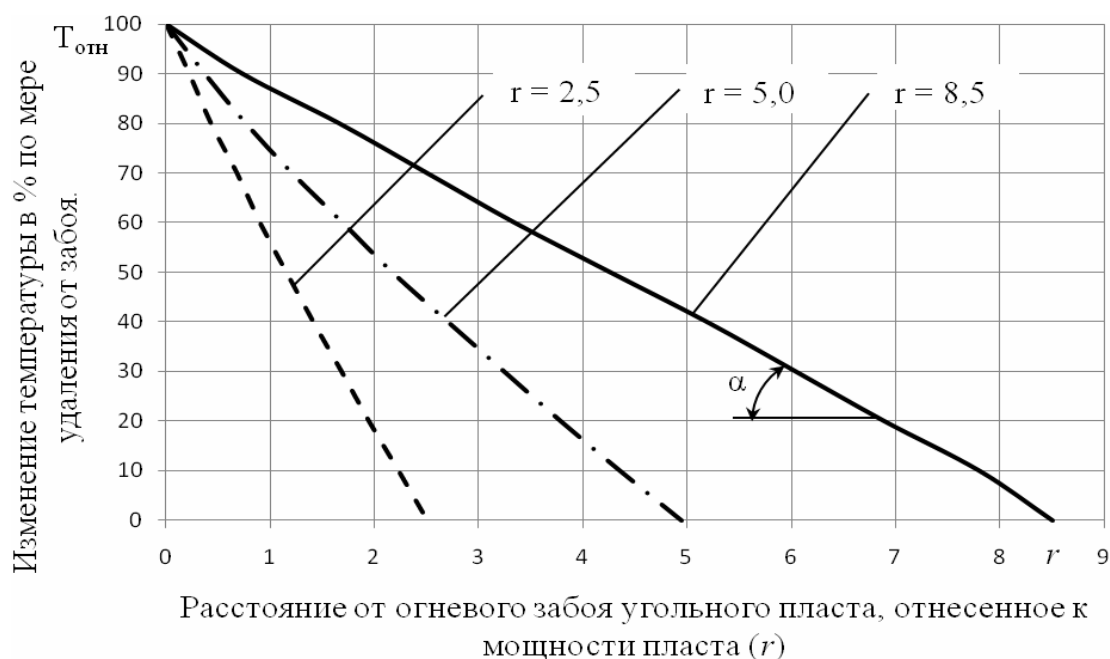


Рисунок 3 - Графики изменения температуры по мере удаления от огневого забоя

Приняв за базовые параметры температуру огневого забоя равную  $1000^{\circ}\text{C}$  и мощность угольного пласта  $m = 1,0$  м из полученных графиков, можно заключить, что при отношении  $r = 2,5$  высокотемпературная

зона ( $T \geq 300^{\circ}\text{C}$  или  $T_{\text{отн}} = 30$ ) распространяется на расстоянии 1,7 м от огневого забоя, для  $r = 5$  составит 3,2 м и для  $r = 8,5$  – 6 м. Таким образом, в большинстве случаев длина участка активного теплообмена составит 3,2 – 6 м, что вполне достаточно для нагрева теплоносителя до заданной температуры  $300^{\circ}\text{C}$  при диаметрах трубных ставов 80 – 150 мм и расходах, обеспечивающих эффективную работу гидропаровых турбин. Это доказывает технологическую возможность осуществления нового способа утилизации тепловой энергии и позволяет рассчитывать параметры теплообмена.

Проведенное моделирование также показало, что чем больше отношение расстояния от огневого забоя к мощности пласта, тем менее резко происходит падение температуры, т.е. более мощный пласт сбрасывает ее быстрее. Это позволяет заключить, что увеличение размеров высокотемпературной зоны не прямопропорционально увеличению мощности пласта, а изменяется по градиенту  $\alpha(r)$  (где  $\alpha$  – угол наклона кривой распределения температуры к горизонтальной оси, см. рис. 3).

### **Библиографический список**

1. Гайко Г. И. Концепция шахты-электростанции, предполагающей подземное сжигание угольных пластов / Г. И. Гайко, В. А. Касьянов, С. М. Семикин // Уголь Украины. – 2006. – №7. – С. 3 – 5.

2. Гайко Г. И. Новий спосіб отримання електроенергії при підземній газифікації (спаленні) вугільних пластів / Г. И. Гайко, В. В. Заєв // Донецький вісник НТШ. Т. 29. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2010. – С. 64 – 67.

3. Фальштинський В.С. Удосконалення технології свердловинної підземної газифікації вугілля / В.С. Фальштинський. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2009. – 131 с.

4. Насонов И.Д. Моделирование физических процессов в горном деле / И. Д. Насонов, В. И. Ресин. – М.: Изд-во Академии горных наук, 1999. – 343 с.

5. Дружинин Н. И. Метод ЭГДА и его применение при исследовании фильтрации / Н. И. Дружинин. - Госэнергоиздат, 1953.

6. Тетельбаум И. М. Электрическое моделирование / И. М. Тетельбаум. - Физматиздат, 1959.

7. Дмитриев И. М. Лабораторные работы по курсу "Подземная Гидромеханика" (часть I. Электромоделирование) / И. М. Дмитриев, В. В. Кадет, Е. Г. Разбегина. - РГУНГ им. И.М. Губкина, 1998.

8. Фильчаков П. Ф. Интеграторы ЭГДА. Моделирование потенциальных полей на электропроводной бумаге / П. Ф. Фильчаков, В. И. Панчишин. – Киев: Изд-во АН УССР, 1961.

*Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Гайко Г.И.*