

*д.т.н. Гайко Г.И.,  
к.т.н. Шульгин П.Н.,  
Заев В.В.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОДЗЕМНОМ ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Представлена методика и результаты моделирования высокотемпературной зоны горения угольного пласта с целью определения размеров участка теплообмена для утилизации тепловой энергии подземного газогенератора. Оценены факторы, влияющие на характер распределения тепла от огневого забоя к зоне обрушенных пород кровли.*

***Ключевые слова:** подземная газификация угля, подземный газогенератор, тепловая энергия, высокотемпературная зона, ядро горения, теплообмен, огневой забой.*

*Представлена методика та результати моделювання високотемпературної зони горіння вугільного пласту з метою визначення розмірів ділянки теплообміну для утилізації теплової енергії підземного газогенератора. Оцінені фактори, що впливають на характер розподілу тепла від вогневого вибою до зони обвалення порід покрівлі.*

***Ключові слова:** підземна газифікація вугілля, підземний газогенератор, теплова енергія, високотемпературна зона, ядро горіння, теплообмін, вогневий вибій.*

**Введение.** Значительное повышение эффективности подземной термохимической переработки угольных пластов может быть достигнуто в случае максимального использования тепловой энергии, выделяемой при горении угля. В настоящее время от 30 – до 50 % этой энергии идет на бесполезный разогрев вмещающих пород подземного газогенератора и не используется производительно. В ДонГТУ разработаны способы утилизации тепловой энергии [1, 2], предполагающие циркуляцию жидкого теплоносителя (воды) в трубных ставах, размещенных в почве газифицируемого угольного пласта. Тепловая энергия утилизируется в основном в высокотемпературной зоне горения пласта и транспортируется на гидропаровые турбины для генерации электроэнергии. Исходя из характеристик гидропаровых турбин и учитывая возможные потери тепла при транспортировке, необходимая температура нагрева теплоносителя в

высокотемпературной зоне должна составлять около 300°C. Для определения технологических параметров топливно - энергетической системы (диаметр трубных ставов, скорость движения теплоносителя, объем его подачи на гидропаровые турбины) определяющим показателем является размер высокотемпературной зоны подземного газогенератора (т.е. зоны распространения высоких температур от огневого забоя в выгазованное пространство), где будет происходить отбор тепла теплоносителем. Исследованию размеров высокотемпературной зоны и оценке факторов, влияющих на ее формирование, посвящена настоящая работа.

#### **Методика моделирования тепловых процессов методом конечных элементов.**

Одним из наиболее предпочтительных методов исследования тепловых процессов, происходящих при сгорании угольного пласта, следует считать численное моделирование методом конечных элементов [3, 4]. Нами был использован многофункциональный современный комплекс программ для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов **ELCUT**<sup>®</sup> 5.8 [5].

ELCUT – это интегрированная диалоговая система программ, позволяющая решать плоские и осесимметричные задачи теплопередачи (расчет температурного поля): для стационарной теплопередачи и нестационарной теплопередачи (тепловые переходные процессы).

При решении тепловых задач используется уравнение теплопроводности в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q - c\rho \frac{\partial T}{\partial t},$$

где  $T$  - температура;

$t$  – время;

$\lambda_x, \lambda_y$  – компоненты тензора теплопроводности;

$q$  – удельная мощность тепловыделения;

$c$  – удельная теплоемкость;

$\rho$  – плотность.

В стационарной задаче последнее слагаемое в правой части уравнений равно нулю.

ELCUT позволяет задать источники тепла в блоках, рёбрах или отдельных вершинах модели. Источник, заданный в конкретной точке плоскости  $XU$ , описывает нагреватель в виде струны, следом которой служит данная точка плоскости, и задается мощностью тепловыделения на единицу длины.

Источник тепла, заданный на ребре модели, соответствует тепло-выделяющей поверхности в трехмерном мире. Он характеризуется поверхностной плотностью тепловыделения и описывается при помощи граничного условия второго рода для ребра. Объемная плотность тепловыделения, заданная для блока модели, соответствует объемному источнику тепла. Следующие виды граничных условий могут быть заданы на внешних и внутренних границах расчетной области.

Условие заданной температуры задает на ребре модели известное значение температуры  $T_0$ . Значение  $T_0$  на ребре может быть задано в виде линейной функции координат. Параметры задающей функции могут меняться от ребра к ребру, но должны быть согласованы так, чтобы функция  $T_0$  не претерпевала разрывов в точках соприкосновения ребер. Этот вид граничного условия иногда называют условием первого рода.

При анализе результатов расчета температурного поля ELCUT позволяет оперировать со следующими локальными физическими величинами:

- температура  $T$ ;
- вектор плотности теплового потока  $F = -\lambda \cdot grad \cdot T$ .

Для достоверности результатов и минимальных погрешностей при моделировании методом конечных элементов к моделям предъявлялись следующие требования:

- должен выдерживаться масштаб геометрического подобия выгазованного пространства;
- необходимо, чтобы размеры КЭ давали подробные и достоверные результаты распределения температуры в выгазованном пространстве;
- погрешность влияния граничных условий модели на результаты моделирования не должна превышать 3 – 5%.

Методикой предусматривались исследования распределения температуры в выгазованном пространстве, образованном после выгорания угольного пласта, находящегося в массиве горных пород. Мощность угольного пласта варьировалась от 0,5 до 3,0 м. Основопологающим фактором, влияющим на распределение тепла, является теплопроводность. Согласно справочным данным [6] для моделирования нами были приняты следующие параметры:

- теплопроводность угля  $\lambda_y = 0,25 \text{ Bm} / \text{м} \cdot \text{К}$ ;
- теплопроводность породы  $\lambda_n = 2 \text{ Bm} / \text{м} \cdot \text{К}$ ;
- теплопроводность газовой среды  $\lambda_z = 0,023 \text{ Bm} / \text{м} \cdot \text{К}$ .

Особо важным являлся выбор конечных размеров горного массива в модели, чтобы избежать влияния краевых эффектов. Для этого объект исследования поместили в массив (рис. 1) с размерами, одинаковыми по высоте и ширине и равными 20 м, что вполне допустимо для задач такого типа. На модели отражен угольный пласт 1, выгазованное пространство газогенератора 2 (между забоем пласта и обрушенными породами кровли), огневой забой 3 и вмещающие пласт породы 4. Разбивку массива по осям X и Y проводили с шагом дискретизации сетки 50 мм. Модель включала в себя четыре блока, 213083 узла сетки, 13 ребер, 10 вершин.

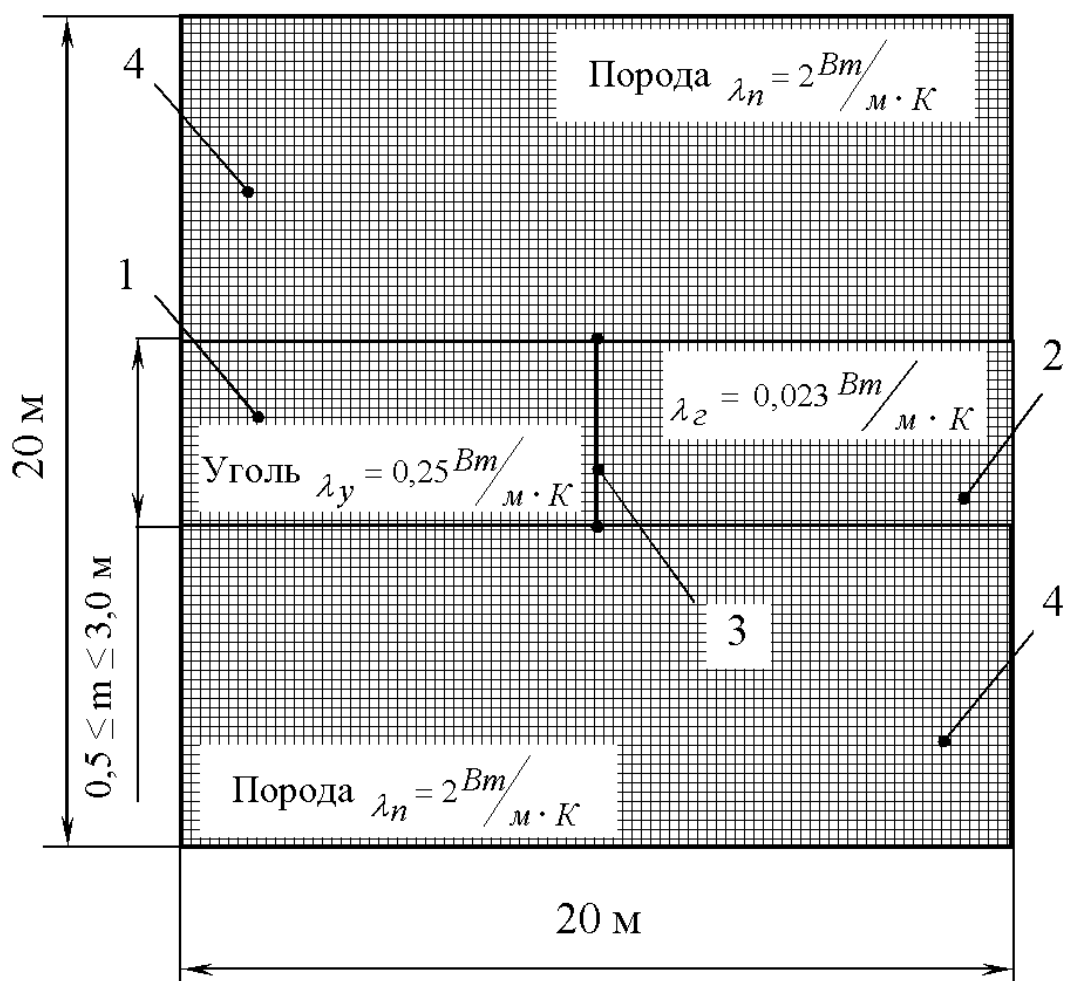


Рисунок 1 – Общий вид модели

При моделировании размеров высокотемпературной зоны были учтены такие влияющие факторы как: температура в ядре горения пласта (изменялась в пределах от 1000 до 1300°C); мощность пласта (от 0,5 до 3 м); длина выгазованной зоны, т.е. расстояние от забоя до обрушенной кровли пласта (от 5 до 10 м); температурный режим газогенератора

в начальной стадии ( $T_{\text{пород}} = 30^{\circ}\text{C}$ ) и в установившейся стадии работы ( $T_{\text{пород}} = 200^{\circ}\text{C}$ ); фактическая теплопроводность угля, вмещающих пород и воздуха. Варианты условий решенных задач сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Характеристика моделей при моделировании распределения температуры в выгазованном пространстве

№ модели	Мощность угольного пласта $m$ , м	Температура очага горения $T_{\text{н}}$ , $^{\circ}\text{C}$	Температура окружающих пород $T_{\text{к}}$ , $^{\circ}\text{C}$	Размер выгазованной зоны $L$ , м
1 - 5	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0	1000	30	10
6-10	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0	1000	30	5
11-15	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0	1300	30	10
16 - 20	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0	1000	200	10
21 - 25	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0	1300	200	10
26	1,0	900	30	10
27	1,0	1100	30	10
28	1,0	1500	30	10

### **Результаты моделирования высокотемпературной зоны вблизи огневого забоя.**

Как видно из таблицы, всего было рассмотрено 28 моделей, для которых были выполнены расчеты распределения температуры при разных мощностях пласта, различных начальных (температура горения угля) и конечных (температура окружающих пород) температурах и разных размерах выгазованной зоны. В качестве примера полученных эпюр распределения тепла в модели приведем случаи для различной мощности пластов (рис. 2). Обработка полученных эпюр для предложенных типов моделей позволила получить графики распределения температуры в выгазованном пространстве для различных условий, часть из которых, характеризующих влияние мощности пласта и температуры горения пласта представлены соответственно на рис. 3 и 4.

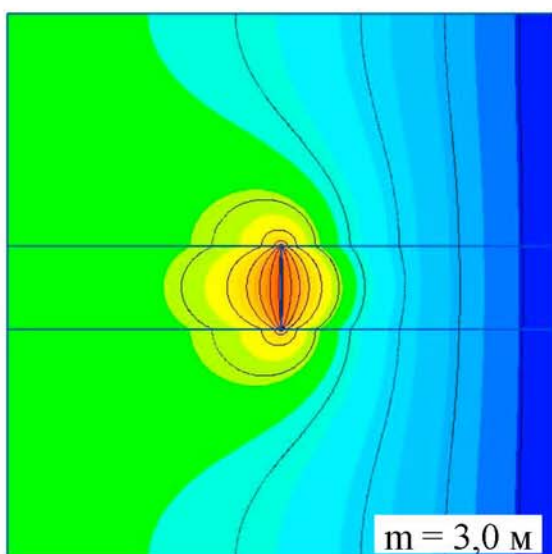
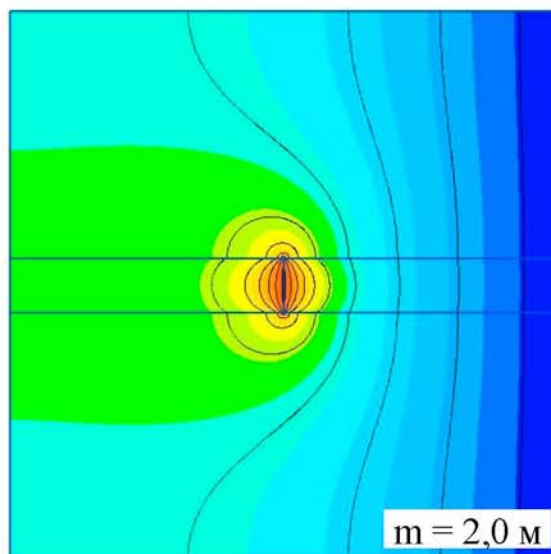
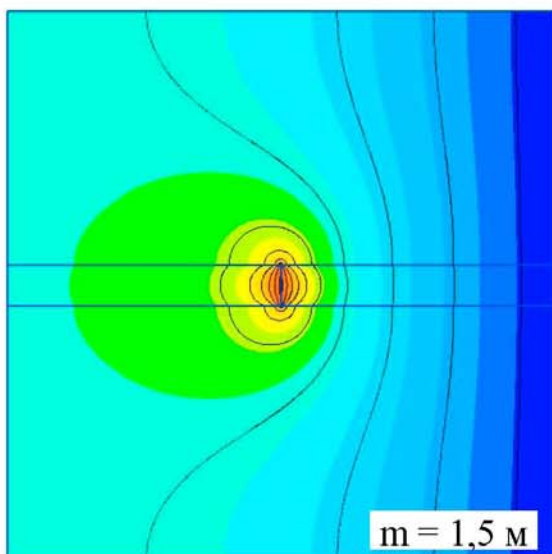
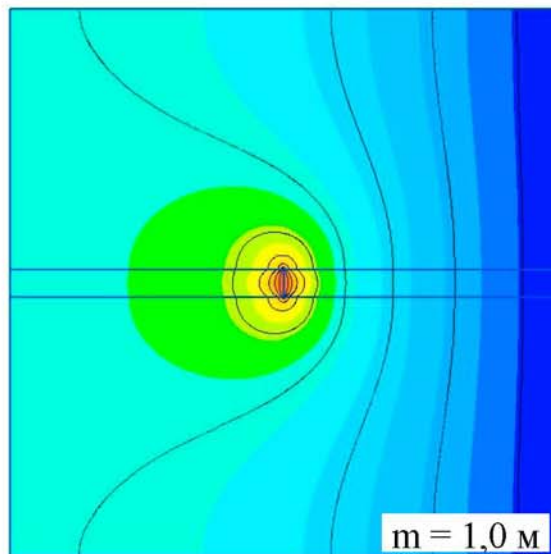
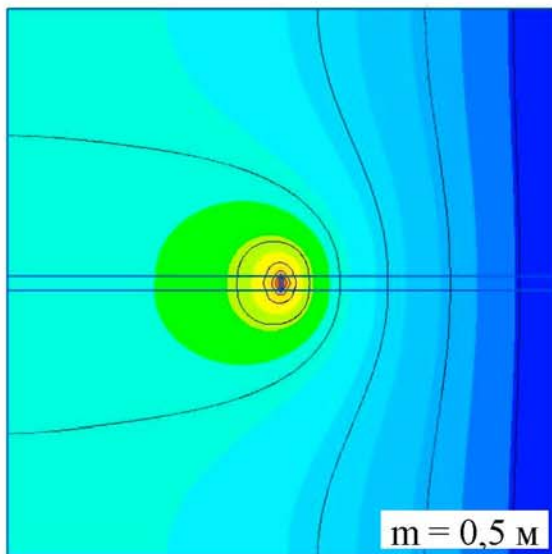


Рисунок 2 – Эпюры распределения  
тепла при изменении мощности  
угольного пласта  $m$ , при  
 $T_{\text{н}} = 1000^{\circ}\text{C}$  и  $T_{\text{к}} = 30^{\circ}\text{C}$

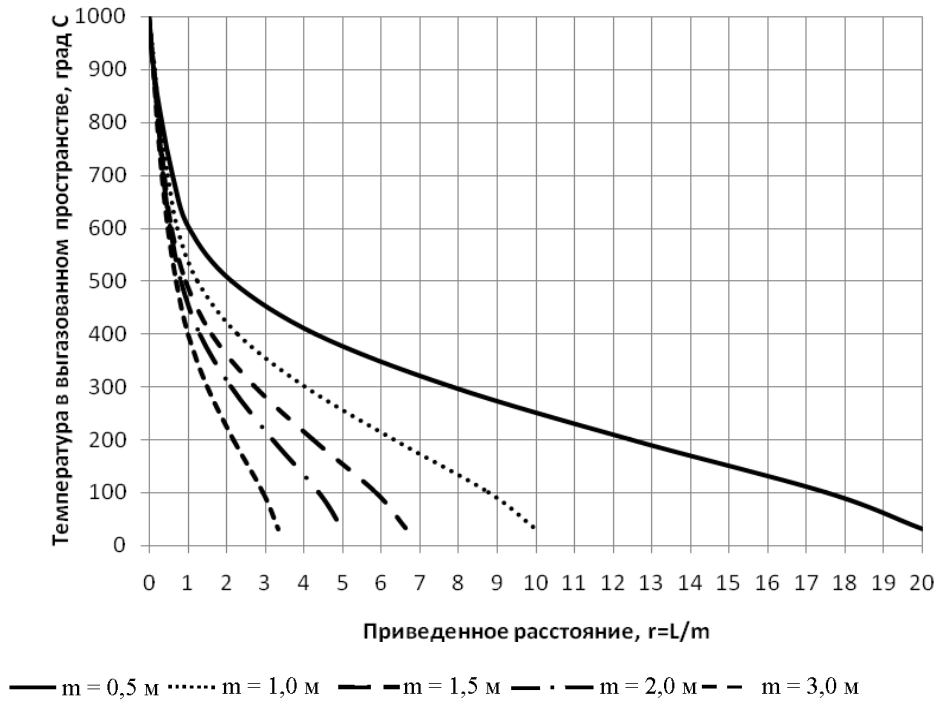


Рисунок 3 - Распределение температуры при изменении мощности угольного пласта  $m$ , при  $T_n = 1000^\circ\text{C}$  и  $T_k = 30^\circ\text{C}$

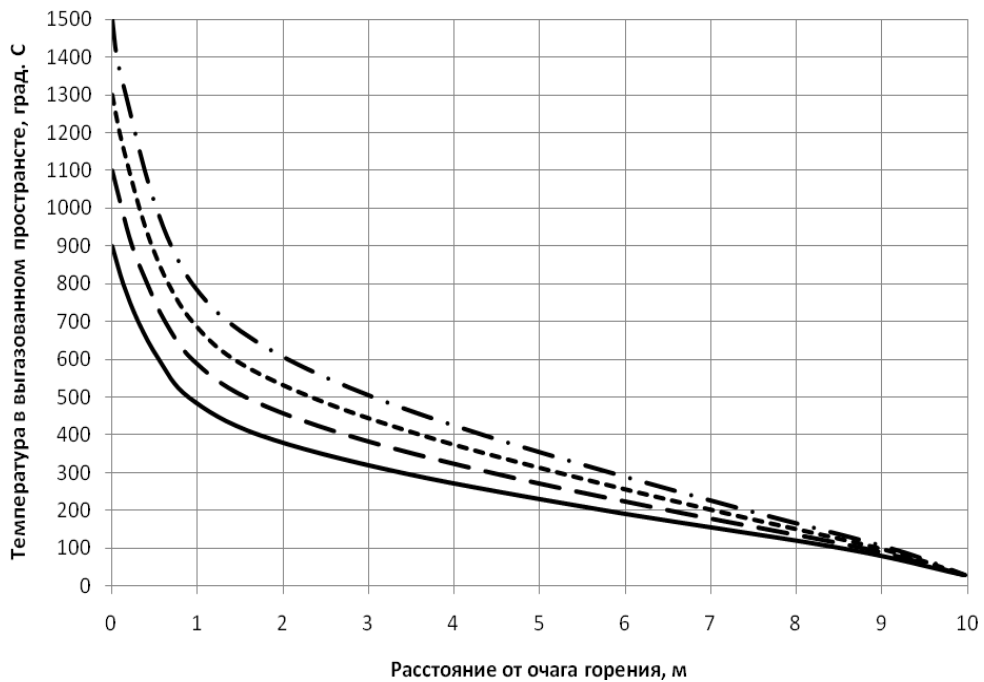


Рисунок 4 - Распределение температуры в выгазованном пространстве при изменении температуры ядра горения угольного пласта  $T_n$  для пласта мощностью  $m = 1,0 \text{ м}$  и  $T_k = 30^\circ\text{C}$  (начальная стадия работы газогенератора)

Для удобства сравнения результатов в зависимости от различных влияющих факторов (мощность угольного пласта, размер зоны выгазовывания, начальная и конечная температура пород, температура очага горения) они сведены в таблицу 2.

Таблица 2 - Результаты моделирования размеров высокотемпературной зоны ( $T \geq 300^{\circ}\text{C}$ )

Мощность угольного пласта $m, \text{ м}$	Размер зоны выгазовывания $L, \text{ м}$	Начальная стадия работы газогенератора $T_{\text{к}} = 30^{\circ}\text{C}$		Установившаяся стадия работы газогенератора, $T_{\text{к}} = 200^{\circ}\text{C}$	
		$T_{\text{н}} = 1000^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{н}} = 1300^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{н}} = 1000^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{н}} = 1300^{\circ}\text{C}$
0,5	10	3,9	5,2	7,6	8,2
1,0	10	4,0	5,3	7,6	8,2
1,5	10	4,1	5,4	7,6	8,3
2,0	10	4,2	5,5	7,7	8,3
3,0	10	4,5	5,7	7,7	8,4

Как видно из графиков (см. рис. 3 и табл. 2) мощность угольного пласта оказывает незначительное влияние на размер высокотемпературной зоны. Так увеличение мощности пласта от 0,5 до 3 м увеличивает размер высокотемпературной зоны ( $T \geq 300^{\circ}\text{C}$ ) всего на 9 – 13 %. Это объясняется тем, что с увеличением мощности пласта происходит пропорциональное увеличение объема газогенератора, повышается концентрация тепла вблизи огневого забоя (за счет высоты выгазованного пространства), возрастает передача тепла по вертикали (вмещающим породам). Полученные закономерности свидетельствуют о предпочтительности использования предложенного способа утилизации тепловой энергии на тонких и весьма тонких пластах. Выявленные размеры высокотемпературной зоны составили от 3,9 м до 5,7 м для начальной стадии работы газогенератора (температура вмещающих пород  $30^{\circ}\text{C}$ ) и от 7,6 м до 8,4 м для установившейся стадии работы (температура вмещающих пород  $200^{\circ}\text{C}$ ). Эти размеры, особенно на установившейся стадии работы, вполне достаточны для осуществления теплообмена между циркулирующим в трубе теплоносителем и окружающей высокотемпературной зоной, что подтверждает принципиальную возможность осуществления разработанного способа утилизации тепла.

Как видим, существенное увеличение размеров высокотемпературной зоны достигается в условиях установившейся работы подземного газогенератора, когда огневым забоем продвинулся на несколько де-



сятков метров и вмещающие породы разогрелись до высоких температур. По данным [7, 8] температура вмещающих пород в подземном газогенераторе длительное время не опускается ниже  $200^{\circ}\text{C}$ . Исследования этой стадии работы показали, что размер высокотемпературной зоны возрастает в 1,6 – 2 раза (см. табл. 2). Поэтому на большей части подземного газогенератора размер высокотемпературной зоны будет в пределах 7,6 – 8,4 м.

Одним из основных факторов, влияющих на размер высокотемпературной зоны, оказалась температура огневого забоя (ядра горения пласта), которая обусловлена теплотворной способностью (маркой) угля и скоростью окислительных процессов в газогенераторе. Как видно из графиков (см. рис. 4), изменение температуры горения угольного пласта  $T_{\text{н}}$  в пределах теоретически возможных значений от  $900^{\circ}\text{C}$  до  $1500^{\circ}\text{C}$  приводит к увеличению размера высокотемпературной зоны ( $T \geq 300^{\circ}\text{C}$ ) с 3,3 м до 5,8 м, т.е. в 1,75 раза. Однако характер изменения температуры с приближением к огневому забою изменяется. Так уровень температуры в  $600^{\circ}\text{C}$  наблюдается на удалении от забоя 0,55 м при  $T_{\text{н}} = 900^{\circ}\text{C}$  м, а при  $T_{\text{н}} = 1500^{\circ}\text{C}$  на расстоянии 2,1 м, т.е. размер зоны изменился почти в 4 раза. Таким образом в непосредственной близости к огневому забою ( $l = 1 - 2$  м) влияние температуры значительно (в 3 – 4 раза) выше, чем при удалении от очага горения, что подтверждает ниспадающий характер графиков на участке вблизи очага горения.

Установлено, что увеличение размеров подземного газогенератора (выгоревшего пространства между угольным забоем и породным завалом) также оказывает влияние на рост высокотемпературной зоны, однако в связи с трудностью управления обрушением пород кровли в подземном газогенераторе, влиять на этот фактор весьма затруднительно. Важно отметить, что давление обрушенных пород кровли передается на трубные ставы через слой золы, который надежно защищает трубы от деформации [9].

### **Выводы.**

Проведенное моделирование тепловых процессов методом конечных элементов позволило определить диапазон изменения важного технологического показателя утилизации тепловой энергии – размер распространения высокотемпературной зоны горения угольного пласта ( $T \geq 300^{\circ}\text{C}$ ), где согласно предложенного способа, происходит отбор тепла циркулирующим в трубных ставах теплоносителем. В зависимости от различных влияющих факторов этот показатель составил от 3,9 до 8,4 м, что вполне удовлетворяет условиям теплообмена. На увеличение размера высокотемпературной зоны существенно влияют температура ядра горения угольного пласта, температура вмещающих пород, стадия

работы и ширина подземного газогенератора (расстояние от забоя до породного завала). Мощность угольного пласта оказывает незначительное влияние на размер высокотемпературной зоны, что позволяет эффективно использовать разработанный способ утилизации тепловой энергии на тонких и особо тонких пластах.

### **Библиографический список**

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

2. Gayko G. *Development of methods for utilization of thermal energy in the underground gasification of coal mining* / Gayko G., Zayev V. // *School of underground mining Technical and Geoinformational Systems in Mining CRC Press Taylor & Francis Group Boca Raton: London, New York, Leiden, 2011. – P.33 – 36.*

3. Бате К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / Бате К., Вилсон Е. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.

Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена / Ши Д.; [пер. с англ.]. – М.: Мир, 1988. – 544 с.

4. ELCUT<sup>®</sup> 5.8 Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. ООО «Тор», Санкт-Петербург. – 2011.

5. Ржевский В.В. Основы физики горных пород / Ржевский В.В., Новик Г.Я. – М.: Недра, 1978. – 390 с.

6. Теория и практика термохимической технологии добычи и переработки угля / Под общ. ред. О.В. Колоколова. – Днепрпетровск: НГА Украины, 2000. – 281с.

7. Жолудєв С.В. Обґрунтування технологічних параметрів підземної газифікації та спалювання бурого вугілля з використанням підземних вод: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.15.02 "Підземна розробка родовищ корисних копалин" / Жолудєв С.В. – Дніпропетровськ, 2008. – 22с.

8. Гайко Г.І. Стендовые испытания трубного коллектора подземного газогенератора / Г.І. Гайко, В.В. Заєв, П.Н. Шульгин // *Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2011»*. – Дніпропетровськ: НГУ, 2011. – С. 62 – 67.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. Бабиюком Г.В.**