

*Заев В.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА В ПОДЗЕМНОМ ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ

Представлена методика и результаты моделирования процесса теплообмена трубного става теплоотводящей скважины и высокотемпературной среды подземного газогенератора при утилизации тепловой энергии сжигания угольного пласта.

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

Представлена методика і результати моделювання процесу теплообміну трубного ставу тепловідвідної свердловини і високотемпературного середовища підземного газогенератора при утилізації теплової енергії спалювання вугільного пласта.

Ключові слова: *підземна газифікація вугілля, підземний газогенератор, тепла енергія, утилізація, 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 [1]. В ДонГТУ разработаны способы утилизации тепловой энергии [2, 3], 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.

Для определения параметров теплообмена были проведены лабораторные исследования, целью которых являлось определение расхода теплоносителя, циркулирующего в пределах высокотемпературной зоны горения пласта, на изменение его температурных характеристик, а так же учет влияния при этом изменения температурного поля на участке теплообмена. Оценивалась степень влияния температуры окружаю-

щей среды в зоне теплообмена, а так же расхода теплоносителя, циркулирующего в трубном ставе на изменение его тепловых характеристик при постоянных характеристиках других влияющих параметров (длина трубопровода находящегося в зоне нагрева, тип теплоносителя и др.).

Схема испытательного стенда и методика исследований.

Для решения поставленной задачи был разработан лабораторный стенд (рис. 1), в котором соотношение диаметров трубных ставов составляло 1:10. Стенд состоит из таких основных элементов: трубный став 1; питательная сеть (источник воды) 2; мерная колба 3, для замера расхода воды; нагревательный модуль 4, датчика температуры 5 размещенного в зоне нагрева, термометры 6 и 7 регистрирующие температуру воды соответственно до и после зоны нагрева.

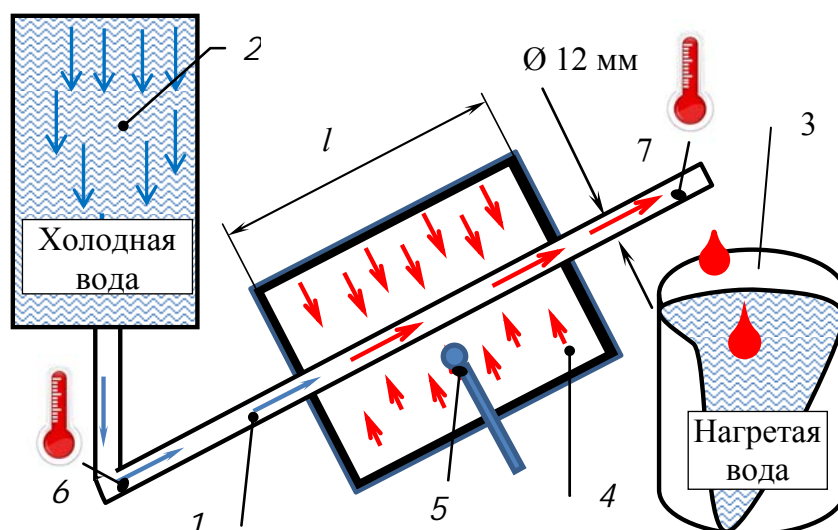


Рисунок 1 – Схема стенда для проведения физического моделирования теплообмена:

- 1 – трубный став; 2 – питательная сеть (источник воды);
- 3 – мерная колба; 4 – нагревательный модуль;
- 5 – температурный датчик в виде термопары;
- 6 и 7 – спиртовые термометры.

Детальная конструкция и основные размеры нагревательного модуля, создающего высокотемпературную среду подземного газогенератора, в которой находится трубный став, показана на рисунке 2. Стенд состоит из цилиндрической емкости 1 (100 × 118 мм), в которой находится электрическая нагревательная спираль 2 (диаметром \varnothing 6 мм и сопротивлением $R_{сп} = 80$ Ом). При этом ширина зоны нагрева составляла 100 мм (количество витков на трубе 10 шт.). Нагревательный элемент был отделен от модели трубного става диэлектрическим изолятором 3

выполненным из керамики.

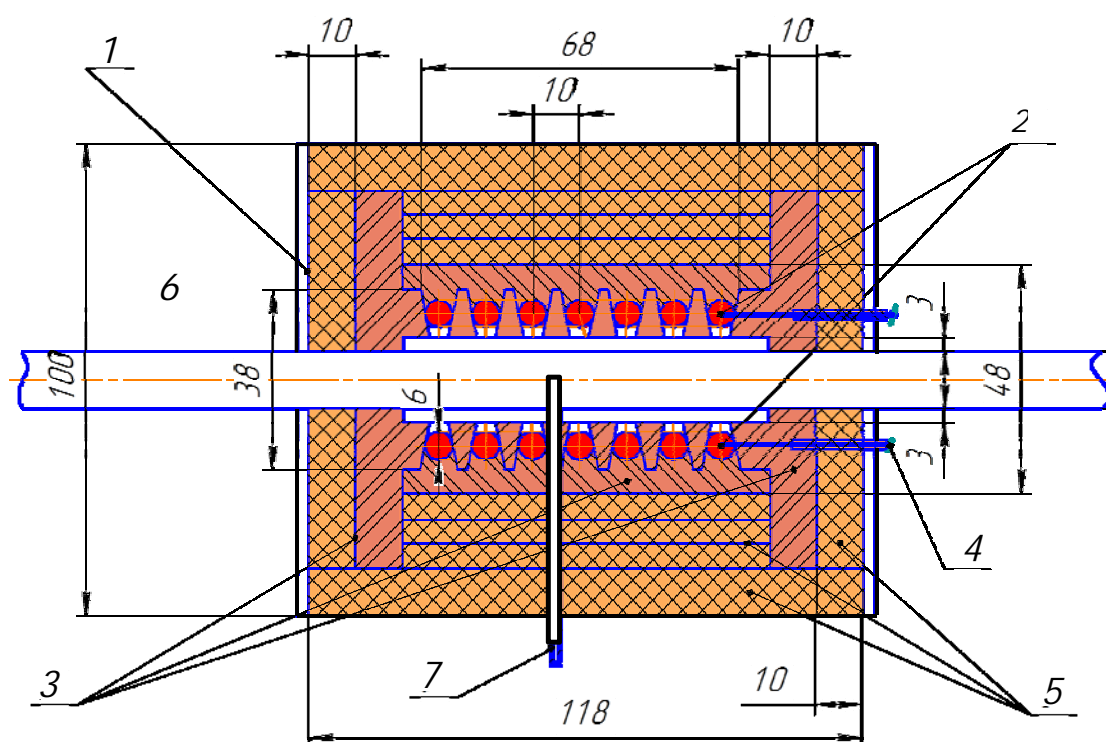


Рисунок 2 – Конструкция нагревательного модуля, создающего высокотемпературную среду:

1 – цилиндрическая емкость; 2 – электрический нагревательный элемент; 3 – керамический изолятор; 4 – клеммы; 5 – асбестовая прокладка; 6 – трубный став; 7 – керамическая трубка.

Напряжение подавалось на клеммы 4. В качестве источника питания использовался лабораторный электроцит (ЩЭ) мощностью 240 В. Дополнительно между внутренней стенкой емкости и нагревательным элементом была установлена прокладка 5 из асбестовой ткани, предотвращающая утечки тепла и непредвиденное замыкание на корпус. Через стенку емкости к нагревательному элементу и трубному ставу 6 проложен канал 7 (керамическая трубка), предназначенный для пропускания по нему хромель - копелевой термопары (температурный диапазон 0 – 1100 °С в длительном режиме), для измерения температуры внутренней среды нагрева.

Модель трубного става представлена металлической трубкой из нержавеющей стали наружным диаметром \varnothing 12 мм, толщиной стенки 0,4 мм и общей длиной 584 мм. Став посредством гибкого шланга подключен к питательной сети для подачи воды, ее температура на входе в модель составляла 9 – 10 °С. Для замера расхода воды ис-

пользовался хронометр и мерная колба объемом 250 мл. Для замера температуры теплоносителя на выходе использовалась дополнительная хромель-копелевая термопара, показания которой дублировались спиртовым термометром.

Методика проведения испытаний на лабораторном стенде заключалась в следующем. По трубному ставу подавалась холодная вода, температура и расход которой фиксировались. После стабилизации расхода воды и достижения заданных температур нагревательного элемента на контрольной термопаре и термометре снимались показания температуры теплоносителя. В качестве прибора, считывающего показания с термопар, использовался мульти-функциональный прибор DT - 838 (Digital Multimeter). Скорость подачи теплоносителя регулировалась объемом подачи в единицу времени, в качестве измерителей использовалась мерная колба и хронометр. Температура зоны нагрева, в которой осуществлялся теплообмен, регулировалась посредством изменения напряжения на клеммах лабораторного электрического щита (ЩЭ). Результаты замеров фиксировались в лабораторном журнале.

Обработка результатов измерений проводилась по известным методикам планирования и обработки экспериментальных данных, достаточно подробно описанным в [4, 5]. Для снижения трудоемкости и времени, при обработке полученных данных, использовались программные комплексы: Microsoft Word, Exsel и Mathcad.

Таким образом, была разработана модель, отражающая процесс утилизации тепла подземного газогенератора с помощью теплоносителя, циркулирующего в трубном ставе.

Результаты лабораторных исследований и их обработка. При измерении выходных параметров лабораторной модели теплообмена трубного става и высокотемпературной зоны горения пласта, основными влияющими факторами является: Q – расход теплоносителя в единицу времени, изменялся в промежутке от 100 до 200 мл / мин (от 0,1 до 0,2 л / мин); T – температура зоны теплообмена, низшая составляла 362 °С, а максимальная 547 °С и размер (длина) участка теплообмена 0,1 м. Для определения степени влияния этих факторов, был задействован способ планирования двухфакторного эксперимента [4, 5]. Так как скорость движения теплоносителя и геометрические размеры трубного става объединены расходом воды, то можно варьировать только два фактора: расход теплоносителя и температуру зоны теплообмена, что обеспечило полный двухфакторный эксперимент. В ходе проведения эксперимента управляли следующими параметрами: расходом воды для заданного диаметра и длины трубопровода, а так же – температурой нагрева вокруг трубного става на фиксированном участке теплообмена. Каждый опыт повторялся по 6 раз, при этом определялась ошибка измерений,

и вычислялись средние значения показаний. Результаты, полученные в ходе исследования и матрица эксперимента, приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты полнофакторного эксперимента

Опыты	Влияющие факторы				
	X_1		X_2		Y
	Температура зоны нагрева $T_{з.н.}, ^\circ\text{C}$		Расход теплоносителя $Q, \text{мл / мин}$		Изменение температуры теплоносителя, $\Delta T, ^\circ\text{C}$
1	-1	362	-1	100	4
2	+1	547	-1	100	12
3	-1	362	+1	200	2
4	+1	547	+1	200	4

Из таблицы видно, что каждому влияющему фактору соответствует код, так X_1 это температура зоны нагрева, которая принимает минимальное (-1) и максимальное свое значение (+1), под X_2 понимается расход теплоносителя в ед. времени, который так же имеет минимальное (-1) и максимальное значение (+1). Матрица эксперимента построена таким образом, что в ней присутствуют все сочетания факторов X_1 и X_2 . Результатом измерений температуры Y до зоны нагрева и после нее получена разность температур $\Delta T, ^\circ\text{C}$ начальной и конечной температуры воды. Для наглядности данные представленные в таблице в алгебраическом виде изображены геометрически на рисунке 3.

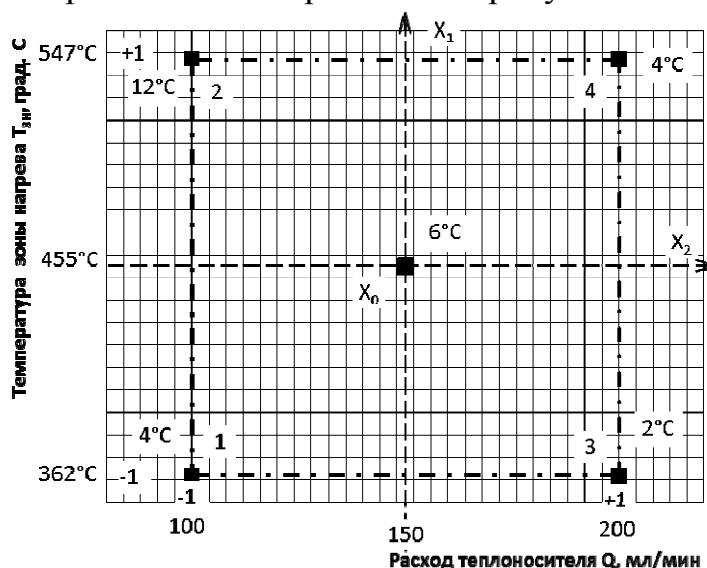


Рисунок 3 - Геометрическая интерпретация полного факторного эксперимента

Средние значения температуры (в высокотемпературной среде X_0)

составляло $T = 455 \text{ }^\circ\text{C}$ и соответственно расхода $Q = 150 \text{ мл / мин}$, а изменение температуры с начальной на конечную $\Delta T = 6 \text{ }^\circ\text{C}$. Так как факторы имеют небольшой разброс можно принять линейную математическую модель процесса в виде уравнения

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2,$$

где x_1 – температура окружающей среды, град $^\circ\text{C}$;

x_2 – расход теплоносителя, мл / мин.

По результатам полного факторного эксперимента, приведенным в таблице, было определены неизвестные коэффициенты модели и получено уравнение изменения температуры воды:

$$\Delta t = 5,5 + 2,5T_{3H} + 2,5Q_T.$$

Коэффициенты при независимых переменных указывают удельный вес влияния исследуемых факторов. Так как в нашем случае эти коэффициенты одинаковы по величине, то можно сделать вывод, что температура зоны теплообмена и расход теплоносителя оказали одинаковое влияние на процесс нагрева воды. Знак перед коэффициентом показывает направление влияния фактора. Так, изменение температуры воды в трубопроводе одинаково изменится как при увеличении температуры окружающей среды, так и при уменьшении расхода воды в равное количество раз.

По результатам исследований были получены зависимости отражающие влияние температуры зоны нагрева рис. 4 и расхода воды рис. 5 на тепловые характеристики теплоносителя.

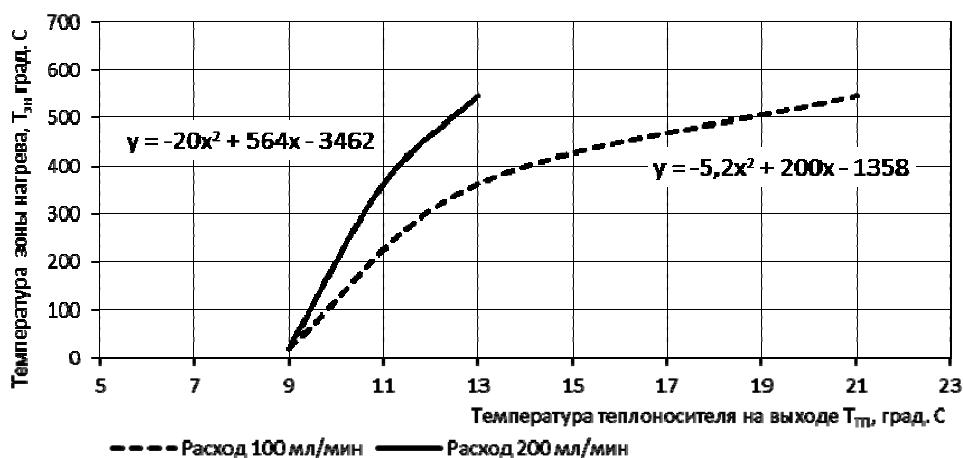


Рисунок 4 – Графики изменения температуры теплоносителя в зависимости от температуры зоны нагрева

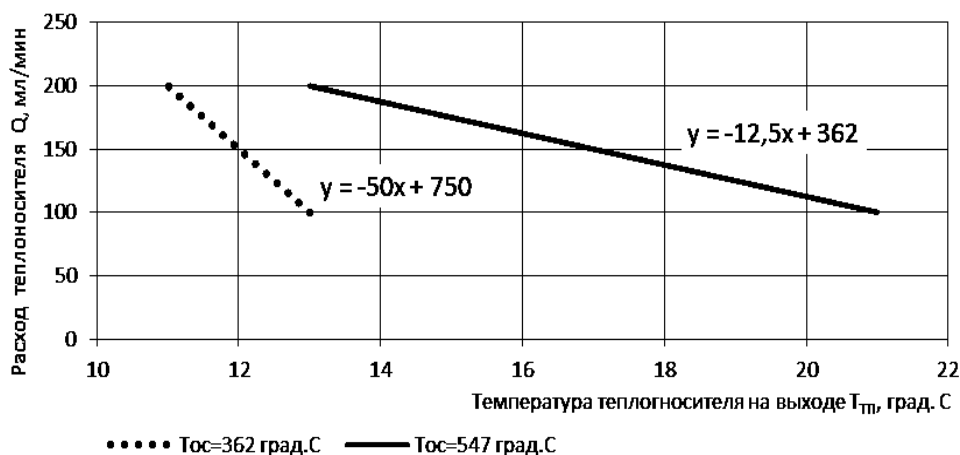


Рисунок 5 – Графики изменения температуры теплоносителя в зависимости от расхода теплоносителя

Как видно из графиков, прохождение теплоносителя (воды) в зоне нагрева (теплообмена) длиной 100 мм обеспечивает повышение температуры воды на 4 – 12 °С в зависимости от принятых расходов (скорости движения) теплоносителя, которая изменяется от 0,1 до 0,2 л/мин. При этом увеличение расхода (скорости подачи) теплоносителя в 2 раза, привело к сокращению температуры на выходе почти в 3 раза. Это позволяет заключить, что расход (скорость движения) теплоносителя является наиболее эффективным фактором управления технологическими характеристиками процесса утилизации. Не смотря на то, что фактор температуры зоны нагрева оказывает такое же влияние, управлять им в реальных условиях подземного газогенератора значительно сложнее: подача окислителя осуществляется на большой объем выгазованного пространства, что сокращает возможности управления скоростью химических реакций. Это обуславливает необходимость расчета подачи теплоносителя, расход которого становится основным технологическим фактором управления процессом теплообмена.

Перевод полученных значений от модели к натуре (где площадь температурного контакта выше в 100 раз, объем подачи в 1000 раз, а ламинарный режим движения теплоносителя сменяется турбулентным) показывает, что при расходе 0,1 м³/мин температура нагрева на метровом участке трубного става составит около 10 °С. При снижении на порядок расхода воды (скорости подачи) нагрев даст 100 °С на 1 м трубы при этом скорость движения теплоносителя по трубе составит около 2 см/с. Как показали расчеты трубного става [6] результаты проведенного моделирования сопоставимы с результатами аналитических исследований.

Таким образом, моделирование процесса теплообмена доказывает практическую осуществимость разработанного способа утилизации те-

пловой энергии образованной при подземной газификации угля, позволяет получить приближенные значения технологических параметров (температура и размер зоны теплообмена, расход теплоносителя и др.) и оценить степень влияния основных факторов.

Автор признателен проф. Гайко Г.И., доц. Касьянову В.А. за консультативную помощь при проведении исследований.

Библиографический список

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

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. *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.*

4. *Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.*

5. *Фрумкин Р.А. Основы научных исследований/ Р.А. Фрумкин // Учебное пособие для вузов. - Алчевск: ДГМИ, ИПЦ «Ладо», 2001.*

6. *Гайко Г.И. Обоснование параметров коллекторной топливно-энергетической системы, основанной на термохимической переработке угольных пластов / Г.И. Гайко, В.А. Касьянов // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. Вып. 24. – Алчевск: ДонГТУ, 2007 – С. 71 - 80.*

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Гайко Г.И.