

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА ТРУБНОГО СТАВА И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗОНЫ ПОДЗЕМНОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА

Г.И. Гайко, В.В. Заев, Донбасский государственный технический Университет, Украина

Приведены методика и результаты физического моделирования процесса теплообмена теплоотдающей скважины (трубного става) и высокотемпературной среды подземного газогенератора при утилизации тепловой энергии сжигания угольного пласта. Установлено влияние основных факторов на изменение температуры жидкостного теплоносителя в трубном стае.

Введение. В последнее время, в связи с повышением стоимости энергетических ресурсов все большее внимание привлекает подземная термохимическая переработка угольных пластов на месте их залегания. Одной из основных проблем технологии подземной газификации угольных пластов (ПГУ) являются значительные (30 – 50%) потери тепловой энергии в недрах, которая непроизводительно расходуется на разогрев вмещающих пород подземного газогенератора [1 – 3]. Утилизация этих потерь дает возможность значительно повысить эффективность подземной термохимической переработки угольных пластов. В ДонГТУ разработан способ скважинного извлечения тепла из зоны горения пласта, предполагающий циркуляцию жидкого теплоносителя (перегретой воды) в трубных ставах теплоотводящих скважин, размещенных в почве угольного пласта, с последующей генерацией дополнительной электроэнергии на гидропаровых турбинах [3, 4]. При этом тепловая энергия утилизируется в основном в высокотемпературной зоне горения пласта (на ограниченном несколькими метрами участке теплообмена).

Для обоснования работоспособности нового способа было проведено физическое моделирование процесса теплообмена, определены параметры теплоносителя (расход, температура), циркулирующего в пределах высокотемпературной зоны горения пласта, в зависимости от характеристик температурного поля в подземном газогенераторе.

Схема испытательного стенда и методика исследований.

Для решения поставленных задач 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.

Детальная конструкция и основные размеры нагревательного модуля, создающего высокотемпературную среду, в которой находится трубный став, показана на рис. 2. Стенд состоит из цилиндрической емкости 1 (100 × 118 мм), в которой находится электрическая нагревательная спираль 2 (диаметром \varnothing 6 мм и сопротивлением $R_{\text{сп}} = 80$ 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.

Напряжение подавалось на клеммы 4. В качестве источника питания использовался лабораторный электропит (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.

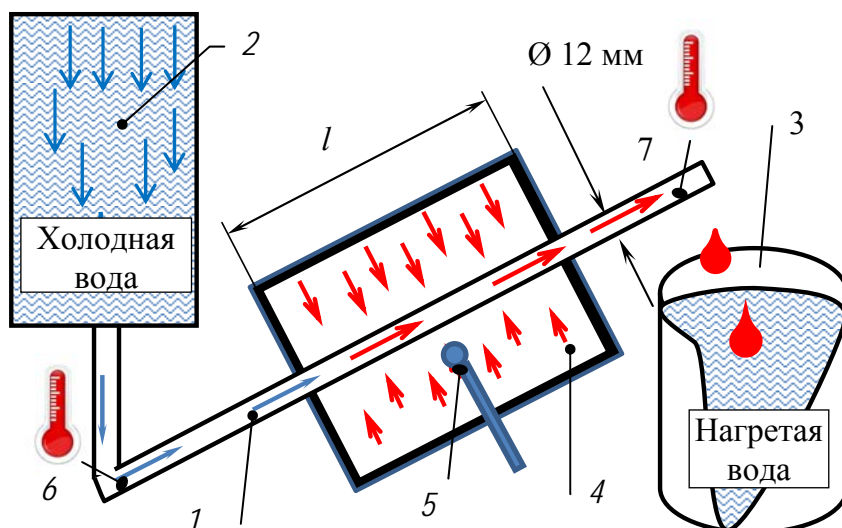


Рис. 1. – Схема стенда для проведения физического моделирования теплообмена:
 1 – трубный став; 2 – питательная сеть (источник воды); 3 – мерная колба;
 4 – нагревательный модуль; 5 – температурный датчик в виде термопары;
 6 и 7 – спиртовые термометры.

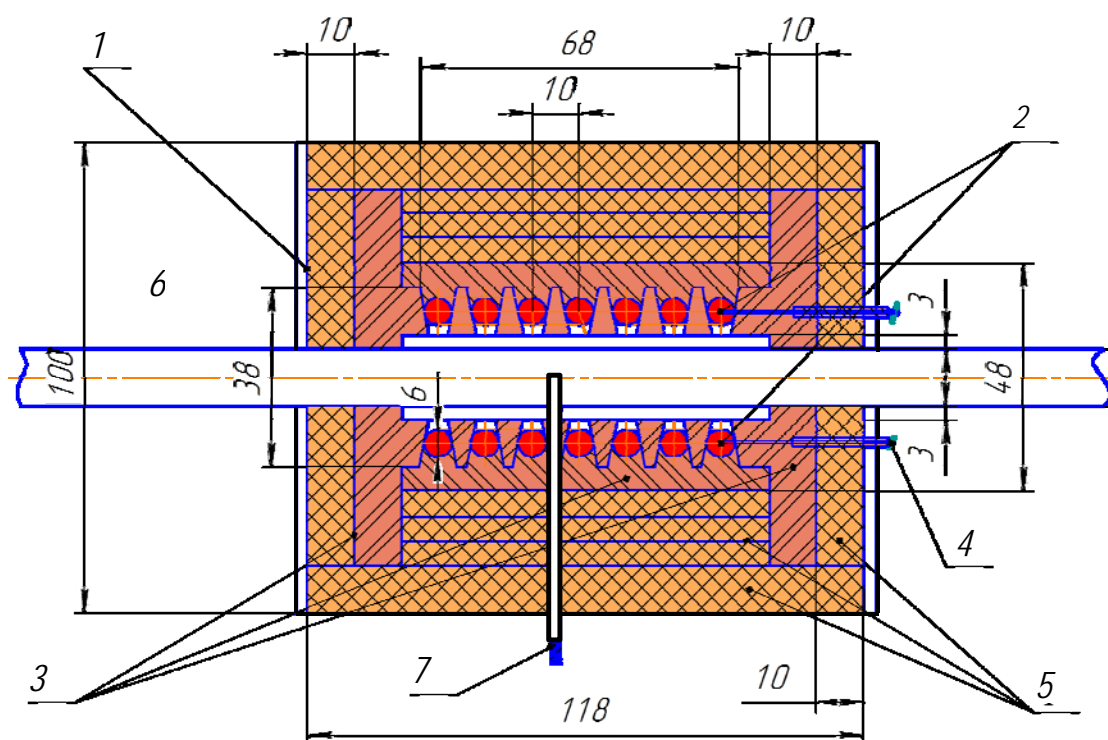


Рис. 2. – Конструкция нагревательного модуля создающего высокотемпературную среду:
 1 – цилиндрическая емкость; 2 – электрический нагревательный элемент; 3 – керамический
 изолятор; 4 – клеммы; 5 – асбестовая прокладка; 6 – трубный став; 7 – керамическая трубка.

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 использовался 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 мультифункциональный 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 [5, 6]. 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 с учетом взаимовлияния факторов [5]. Так как скорость движения теплоносителя и геометрические размеры трубного става объединены расходом воды, то можно варьировать только два фактора: расход теплоносителя и внешнюю 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.

Основной целью регрессионного анализа являлось получение по результатам активного эксперимента модели, адекватно описывающей процесс теплообмена трубного става и высокотемпературной среды подземного газогенератора. В ходе эксперимента соблюдались следующие требования: проведение эксперимента - строго соответствовало выбранному случайному порядку, а установка уровней факторов X_i проводилась в соответствии с теоретическими предпосылками регрессионного анализа; для обеспечения точности результатов измерения выхода Y (факторного пространства) проводилась серия из 6 опытов.

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 , а также учитывается взаимовлияние расхода теплоносителя и температуры среды X_1X_2 . Центром плана эксперимента является X_0 . Средние значения температуры (в высокотемпературной среде X_0) составляло $T=455$ °С и соответственно расхода $Q=150$ мл / мин, а изменение температуры с начальной на конечную $\Delta T=6$ °С. Результатом измерений температуры Y до зоны нагрева и после нее получена разность температур ΔT , °С начальной и конечной температуры воды Исходя из принципа планирования эксперимента для проведения двухфакторного эксперимента потребовалось проведение четырех опытов.

В ходе обработки результатов эксперимента вычислялись среднее значение выходной величины (температуры теплоносителя) и ее оценка (дисперсия). Найденные таким образом построчные дисперсии использовались для проверки воспроизводимости опытов, заключающейся в оценке однородности построчных дисперсий. Результаты, полученные в ходе исследования и матрица эксперимента, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты двухфакторного эксперимента с учетом взаимодействия

№	Наименование фактора						Изменение температуры воды на выходе из модели Δt , °C						Средняя Температура	Дисперсия
	X_0	X_1	X_2		$X_1 X_2$		Δy_{1i}	Δy_{2i}	Δy_{3i}	Δy_{4i}	Δy_{5i}	Δy_{6i}		
	Центр плана эксперимента	Расход теплоносителя Q, мл / мин	Температура зоны нагрева $T_{з.н}$, °C		Взаимодействие факторов $Q T_{з.н}$									
1	+1	+1	20 0	-1	362	-1	2	2	2	3	2	2	2.16	0.2
2	+1	+1	20 0	+1	547	+1	3	4	5	5	5	5	4,5	0,7
3	+1	-1	10 0	+1	547	-1	21	21	20	20	20	19	20.16	0.6
4	+1	-1	10 0	-1	362	+1	3	3	3	3	4	5	3.5	0.7

Обработка результатов эксперимента также показала, что все значения коэффициентов в уравнении регрессии являются статистически значимыми, а полученная модель описывающая процесс теплообмена теплоотдающей скважины и высокотемпературной среды адекватна исследуемому объекту.

Так как факторы имеют небольшой разброс, была принята линейная математическая модель процесса в виде уравнения

$$y = b_0 \cdot x_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2,$$

где x_1 – температура окружающей среды, град С;

x_2 – расход теплоносителя, мл / мин.

По результатам полного факторного эксперимента с учетом взаимодействия управляемых факторов, приведенных в таблице 1, были определены неизвестные коэффициенты модели и получена математическая модель, описывающая влияние температуры окружающей среды и расхода теплоносителя на изменение температуры воды, которая приняла вид:

$$\Delta t = 7.58 - 4.25Q + 4.75T_{з.н} - 3.58QT.$$

Коэффициенты при независимых переменных указывают удельный вес влияния исследуемых факторов. Так как в нашем случае эти коэффициенты близки по величине, то можно сделать вывод, что температура зоны теплообмена и расход теплоносителя оказали схожее (хотя и противоположенное) влияние на процесс нагрева воды. Знак перед коэффициентом показывает направление влияния фактора. Как видим, удельный вес фактора изменения температуры оказывается в 1,12 раза выше влияния фактора расхода воды. Полученная модель приведена на рис. 3.

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

Как видно из графиков, прохождение теплоносителя (воды) в зоне нагрева (теплообмена) длиной 100 мм обеспечивает повышение температуры воды на 4 – 12 °C 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 тепловой энергии. Не смотря на то, что фактор температуры зоны нагрева оказывает подобное 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.

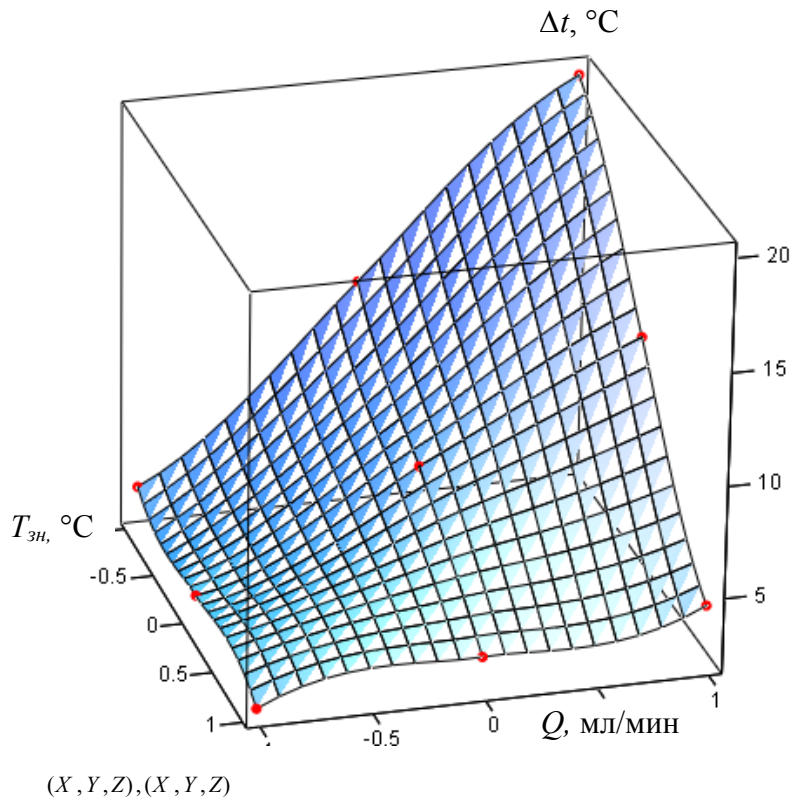


Рис. 3. Модель изменения температуры теплоносителя от расхода воды и температуры среды

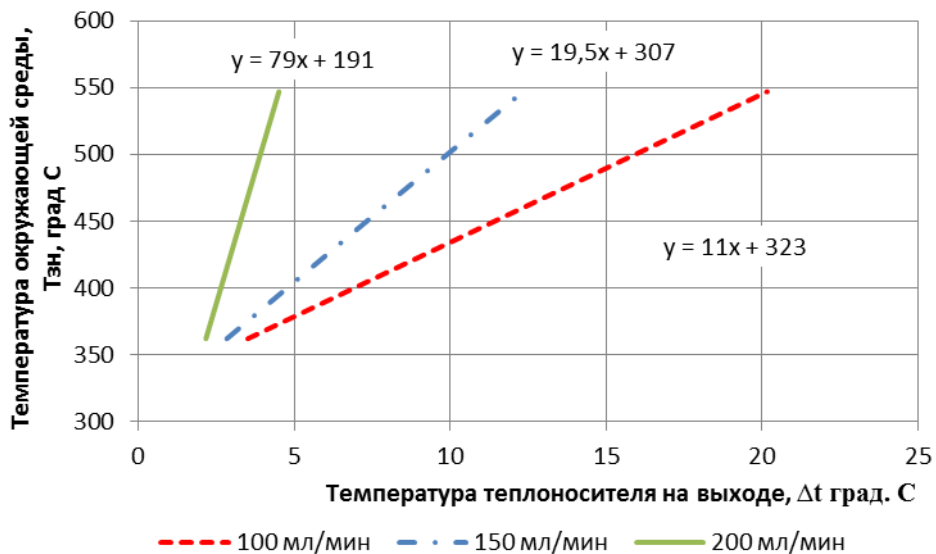


Рис. 4. – Графики изменения температуры теплоносителя в зависимости от температуры зоны нагрева

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 $0,1 \text{ м}^3/\text{мин}$ температура нагрева на метровом участке трубного става составит около $10 \text{ }^\circ\text{C}$. При снижении на порядок расхода воды (скорости подачи) нагрев даст $100 \text{ }^\circ\text{C}$ на 1 м трубы при этом скорость движения теплоносителя по трубе составит около 2 см/с. Таким образом, в зависимости от размеров высокотемпературной зоны [7] возможно варьировать температуру нагрева от 10 до $100 \text{ }^\circ\text{C}$ на одном погонном метре трубного става в зависимости от расхода теплоносителя (скорость от 2 до 20 см/с). Как показали расчеты трубного става, результаты проведенного моделирования сопоставимы с результатами аналитических исследований [8].

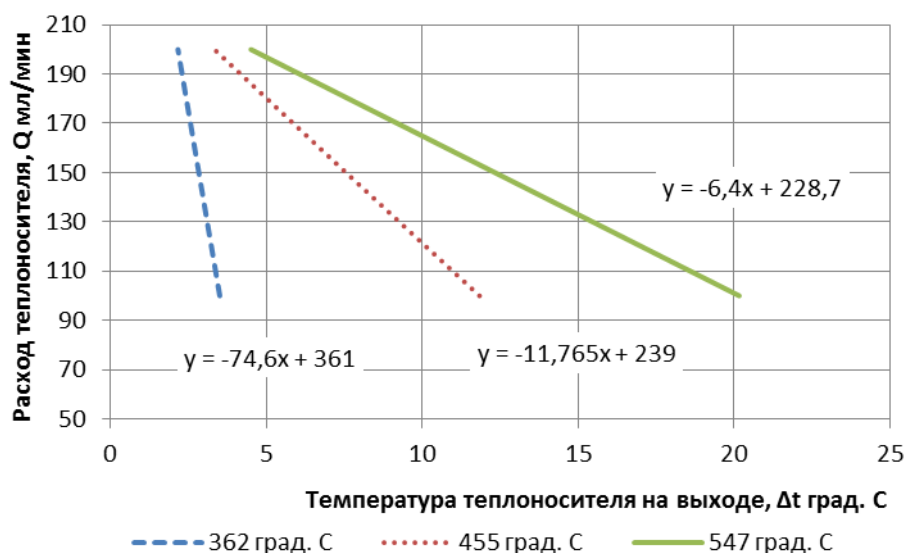


Рис. 5. – Графики изменения температуры теплоносителя в зависимости от расхода теплоносителя

Таким образом, моделирование процесса теплообмена доказывает практическую осуществимость разработанного способа утилизации тепловой 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.

Список литературы

1. Теория и практика термохимической технологии добычи и переработки угля: Монография / Под общ. ред. О.В. Колоколова. – Днепропетровск: НГА Украины, 2000. – 281 с.
2. Фальштинський В.С. Удосконалення технології свердловинної підземної газифікації вугілля. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2009. – 131 с.
3. 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.
4. 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.
5. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
6. Фрумкин Р.А. Основы научных исследований/ Р.А. Фрумкин // Учебное пособие для вузов. - Алчевск: ДГМИ, ИПЦ «Ладо», 2001.
7. Гайко Г.И. Моделирование тепловых процессов в подземном газогенераторе методом конечных элементов / Г.И. Гайко, П.Н. Шульгин, В.В. Заев // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. Вып. 36 – Алчевск: ДонГТУ, 2012. – С. 52 – 61.
8. 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.