



УДК 620.197:629.7.023

doi.10.70769/2181-2284.ME.1(22).2026.6

ЗАЩИТА ТЕПЛОПРИЕМНОЙ ЧАСТИ ГЕЛИОПИРОЛИЗНЫХ РЕАКТОРОВ ОТ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ И ПОВЫШЕНИЕ ИХ ТЕПЛОВЫХ ИНЕРЦИЙ**Узаков Гулом Норбоевич¹** - д.т.н, проф.e-mail: uzoqov66@mail.ru**Якубов Салимжон Иномжонович²** - к.т.н., старший научный сотрудник,e-mail: salimjon@yandex.com**Умидиллаев Джахонгир Хасанович¹** - стажер-исследователь,e-mail: jahon-22@mail.ru**Турдиев Мухиддин Шукурович³** - заведующий лабораторией,e-mail: gorovli54@gmail.com**Евстафеев Евгений Александрович³** - преподаватель,e-mail: johnnygeniy@mail.ru¹Каршинский Государственный Технический Университет г. Карши, Узбекистан.²Институт общей и неорганической химии АН РУз. Г. Ташкент, Узбекистан.³Филиал Российского Государственного Университета нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в городе Ташкенте

Введение. Проблема предотвращения перегрева приемной части и повышения интенсивности теплообмена в гелиопиролизных реакторах, работающих при высоких температурах, имеет важное значение.

Методы и материалы. В работе исследованы способы защиты приёмной части и повышения теплообмена в гелиопиролизных реакторах, функционирующих на основе параболических концентраторов. Использованы расчётно-теоретические и экспериментальные методы, основанные на уравнениях термодинамики и теплопередачи.

Результаты. По результатам трехлетней эксплуатации выявлено, что в донной части реактора происходит термодеструкция материала и образуются неровности глубиной 0,3–2,3 мм. В качестве защитного материала выбран графитовый материал с низкой теплопроводностью, высокой жаростойкостью и устойчивостью к окислению.

Заключение. Предложенное покрытие обеспечивает эффективную защиту приемной части гелиореактора, повышает его надежность и увеличивает срок эксплуатации.

Дата поступления: 04.02.2026. После обработки: 06.03.2026 Принято печать: 24.03.2026

For citation: Uzakov G.N., Yakubov S.I., Umidillaev J.H., Turdiev M.Sh., Evstafeev E.A. Heliopyrolysis Reactors Against Thermal Degradation and Enhancement of their Thermal Inertia. Alternative Energy. 2026. 1(22). pp. 47-56. (In Rus.)

УО‘К 620.197:629.7.023

GELIOPIROLIZ REAKTORLARINING ISSIQLIK QABUL QILUVCHI QISMINI TERMODESSTRUKSIYADAN HIMOYA QILISH VA ULARNING ISSIQLIK ALMASHINUVINI OSHIRISH**Uzoqov G‘ulom Norboyevich¹** – t.f.d., prof.,e-mail: uzoqov66@mail.ru**Yakubov Salimjon Inomjonovich²** – t.f.n., katta ilmiy xodim,e-mail: salimjon@yandex.com**Umidillayev Jahongir Hasanovich¹** – stajyor-tadqiqotchi,e-mail: jahon-22@mail.ru



Turdiyev Muhiddin Shukurovich³ – laboratoriya mudiri

e-mail: gorovli54@gmail.com

Evstafeyev Evgeniy Aleksandrovich³ – o'qituvchi

e-mail: johnnygeniy@mail.ru

¹Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi, O'zbekiston

²O'zbekiston Respublikasi FA Umumiy va noorganik kimyo instituti, Toshkent, O'zbekiston

³I.M. Gubkin nomidagi Rossiya davlat neft va gaz universiteti (MIU) Toshkent filiali

Annotatsiya. Kirish. Yuqori haroratda ishlovchi geliopirroliz reaktorlarida qabul qiluvchi qismning qizib ketishini oldini olish va issiqlik almashinuvini oshirish muammosi muhim ahamiyat kasb etadi.

Usul va materiallar. Tadqiqot ishida parabolik konsentratorlar asosida ishlovchi geliopirroliz reaktorlarining qabul qiluvchi qismini himoyalash hamda issiqlik almashinuvini oshirish yo'llari o'rganildi. Ishda termodinamika va issiqlik uzatish tenglamalariga asoslangan hisoblash-nazariy hamda eksperimental usullar qo'llanildi.

Natijalar. Uch yillik ekspluatatsiya natijalariga ko'ra reaktor tub qismida materialning termodestruksiya hamda 0,3–2,3 mm chuqurlikdagi notekisliklar hosil bo'lishi aniqlandi. Himoya materiali sifatida issiqlik o'tkazuvchanligi past, yuqori haroratga chidamli va oksidlanishga bardoshli grafit asosidagi material tanlandi.

Xulosa: Taklif etilgan qoplama gelioreaktorning qabul qiluvchi qismini samarali himoya qilish va uning ishonchiligi hamda ishlash muddatini oshirish imkonini beradi.

UDC 620.197:629.7.023

HELIOPYROLYSIS REACTORS AGAINST THERMAL DEGRADATION AND ENHANCEMENT OF THEIR THERMAL INERTIA

Uzakov Gulom Norboevich¹ – DSc, Professor,

e-mail: uzogov66@mail.ru

Yakubov Salimjon Inomjonovich² – PhD, Senior Researcher,

e-mail: salimjon@yandex.com

Umidillaev Jahongir Hasanovich³ – Researcher,

e-mail: jahon-22@mail.ru

Turdiyev Muhiddin Shukurovich³ – Head of Laboratory,

e-mail: gorovli54@gmail.com

Evstafeyev Evgeniy Aleksandrovich³ – Lecturer

e-mail: johnnygeniy@mail.ru

¹Karshi State Technical University, Karshi, Uzbekistan

²Institute of General and Inorganic Chemistry, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

³Branch of Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NRU) in Tashkent

Introduction. The problem of preventing overheating of the receiver section and enhancing heat transfer in high-temperature heliopyrolysis reactors is of significant importance.

Methods and Materials. The study investigates methods for protecting the receiver section and improving heat transfer in heliopyrolysis reactors operating with parabolic concentrators. Both theoretical-calculation and experimental approaches based on the fundamental equations of thermodynamics and heat transfer were employed.

Results. Based on three years of operation, thermal degradation of the reactor bottom material and the formation of surface irregularities with depths ranging from 0.3 to 2.3 mm were





identified. A graphite-based material with low thermal conductivity, high heat resistance, and oxidation resistance was selected as the protective layer.

Conclusion. The proposed coating effectively protects the receiver section of the helioreactor, improves its reliability, and extends its operational lifetime.

Введение

Проблема защиты поверхностей от перегрева с использованием термобарьерных покрытий существует давно и находит решение в различных отраслях промышленности в зависимости от конкретного применения: в аэрокосмонавтике, энергетике, двигателестроении и других секторах. В качестве защитных материалов применяются жаропрочные металлические сплавы и металлокерамические композиции, сплавы оксида алюминия, графит и пластмассы. В энергетике они используются для защиты лопаток газовых турбин, в аэрокосмонавтике — для огневой, радиационной и тепловой защиты, а также в обмундировании пожарных и других спасательных служб для предотвращения ожогов [1]. Главным достоинством термобарьерных покрытий считается их универсальность применение в различных отраслях промышленности. В добавок к существующим арсеналом теплозащитных покрытий ежегодно синтезируется десятки новых средств, типа RCC, UHTC, КМЦ, обладающие высокими качествами. Многообразие линейки теплозащитных средств и технологических задач позволяет инженерам выбрать оптимальные покрытия по специфическим требованиям и условиям использования [1,2]. При периодическом воздействии высоких температур на приёмную часть гелиореактора происходит изменение микроструктуры металла, что приводит к снижению прочности и других механических свойств. Усиливаются процессы окисления и коробления поверхностей, что приводит к потере работоспособности реактора. В качестве решения проблемы применено покрытие днища реактора графитом, что позволило частично снизить перегрев [2-4]. Однако внутренняя поверхность теплообмена требует поддержания определённой температуры, обеспечивающей режим пиролиза для конкретного типа отхода. Традиционно принято следующие температурные пределы: низкотемпературный ($550-650^{\circ}\text{C}$), среднетемпературный ($650-800^{\circ}\text{C}$) и высокотемпературный ($850-1000^{\circ}\text{C}$) пиролиз. Эта температура зависит от толщины графитового слоя, что формирует задачу нестационарного теплообмена. Решение требует применения уравнения Фурье и теплового баланса [5-7]. В ходе экспериментов было отмечено резкое падение температуры пиролиза при скорости ветра 3–5 м/с, что указывает на значительную роль конвективных теплопотерь. Для снижения этих потерь боковая, внутренняя поверхности цилиндра были покрыты карборундом и снаружи теплоизоляционным материалом, что позволило уменьшить тепловые потери через боковые стенки и повысить тепловую инерцию реактора.

В настоящее время в Узбекистане действуют и строятся несколько заводов по пиролизной переработке бытовых отходов с производством тепловой и электрической энергии [8]. Анализ известных технологических схем пиролизных установок и конструкций пиролизных реакторов показывают, что более энергосберегающим вариантом по сравнению традиционными являются гибридные и гелиопиролизные установки. Гелиопиролизные установки (рисунок 1) привлекательны своей простотой в изготовлении, экономичностью и экологичностью, а также возможностью получения горючего газа и других химических продуктов. Они могут быть полезны для нужд фермерских хозяйств, малых предприятий и частного хозяйства.

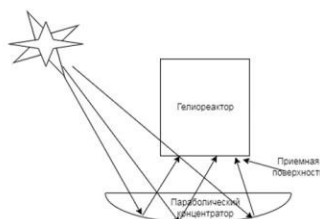


Рис.1. Схема существующей системы гелиопиролиза.

Таким образом, совершенствование конструкции солнечных устройств является актуальной задачей в русле «зеленой экономики» в создание современных гелиореакторов. Актуальность решения задачи определяется проблемой высокотемпературного воздействия на теплоприёмную поверхность гелиопиролизных реакторов при переработке углеродсодержащих растительных отходов, приводящего к короблению и сгоранию торцевых слоёв металла (рисунок 2), что сокращает срок службы реактора.

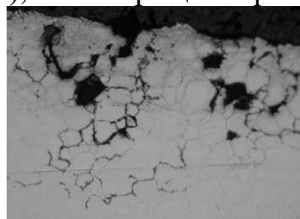


Рис.2. Термодеструкция дна гелиопиролизного реактора М20:1.

Целью исследования является создание конструкции, которая обеспечивает тепловую защиту поверхности нагрева гелиореактора от концентрированной солнечной энергии и повышение тепловой инерции для подавления конвективного эффекта на пиролизный процесс.

Материалы и методы

Исследование выполнено с использованием расчётно-теоретического метода и экспериментов основанного на уравнениях термодинамики и теплопередачи. Методика включает выбор оптимального термобарьерного покрытия для приёмной части гелиореактора и определение температурного поля в условиях стационарной теплопередачи [9,10]. Сравнение полученных расчётно-теоретических данных с экспериментальными данными дали положительные результаты.

В качестве объекта исследования принят гелиореактор с цилиндрической формой корпуса (рисунок 3). Материал корпуса – медь. Внутренняя поверхность покрыта термобарьерными слоями различной толщины:

- графитовое покрытие дна с наружи - диапазон изменения высоты h_3 от 0 до 10 мм;
- карборундовое покрытие боковых стенок реактора с внутри - толщиной 5 мм.
- С наружи реактор покрыт теплоизоляционным материалом – гипс строительный, толщиной 20мм.

Перед установкой подложки защитных поверхностей очищаются до блеска, слабым кислотным раствором (можно уксусным) и приклеивается, клеем на основе алюмофосфатной связки [11], который имеет жаропрочность более 1000 °С.

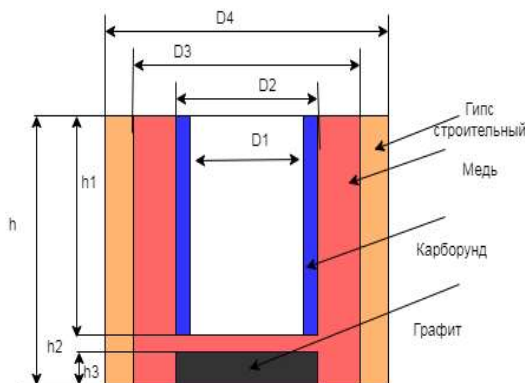


Рис. 3 Условная схема гелиопиролизного реактора с покрытиями.

Геометрические размеры реактора: $D_1 = 90$ мм, $D_2 = 100$ мм, $D_3 = 108$ мм, $D_4 = 148$ мм, $h_1 = 115$ мм, $h_2 = 4,0$ мм, $h_3 = 0-10$ мм. Теплофизические характеристики теплозащитных покрытий приведены в таблице 1.



Таблица 1.

Теплофизические характеристики применяемых материалов

№	Материал	Плотность ρ кг/м ³	Теплоемкость C_p , Дж/(кг·°C)	Теплопроводность λ , Вт·м/°C	Толщина h , м
1	Fe до модернизации	7800	450	47	$4 \cdot 10^{-3}$
2	Cu	8900	400	420	$4 \cdot 10^{-3}$
3	C- Графит	1700-2000	700-800	1500 пиролитический 80-400 технический	$(1-10) \cdot 10^{-3}$
4	C+Si Карборунд	3210	700	20	$5 \cdot 10^{-3}$
5	Гипс строительный	1300	1090	0,23	$20 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2

Характеристика теплоизоляционных материалов

№	Материал	Теплопроводность λ , Вт·м/°C	Доступность	Пожаропасность	Отн. стоимость
1	Известь+песок	0,87	-	-	низкий
2	Алебастровые плиты	0,47	-	-	высокий
3	Гипс строительный	0,23	-	-	высокий
4	Песок сухой	0,33	+	-	низкий
5	Стекловолокна	0,036	-	-	высокий
6	Вата минеральная	0,045	-	-	высокий
7	Опилки древес. сухие	0,065	+	+	низкий

Теоретический расчет состоит из трех разделов, в первом разделе рассматривается температурное поле по всему объему термопокрытия, во втором изучается, как изменяется температура по высоте составных частей реактора, другими словами, как скоро достигается необходимая температура процесса пироллиза. В третьем разделе рассматривается вопрос повышения тепловой инерции системы.

Для упрощения инженерного анализа изменение температурного поля, приняты следующие допущения:

1. Мощность теплового потока постоянна во времени.
2. Нагревание термобарьера происходит равномерно по всему объему.
3. Потерями тепла конвекцией и излучением в окружающую среду пренебрегаем.

В реальном гелиопироллизе при радиоационно- конвективном теплообмене, тепловая мощность, поступающая от параболического концентратора, определяется выражением:

$$W_0 = G \cdot A \cdot \gamma \quad (1)$$

где G – интенсивность солнечного потока, Вт/м²; A – площадь апертуры концентратора, м; γ – коэффициент преобразования солнечной энергии.

Принимаем $A=1$ м², задаем тепловые мощности $W_0=300, 600, 900$ Вт и рассчитываем среднюю температуры покрытий.

Количество тепла, передаваемое днищу реактора за время τ , определяется из уравнение теплового баланса [4]:

$$Q_0 = m_r \cdot C_{pr} \cdot (t_r - t_{oc}) = W_0 \tau \quad (2)$$

где m_r – масса графита, кг; C_{pr} – теплоемкость графита, кДж/(кг·°C);
 t_r – температура графита, являющаяся функцией времени, °C;
 t_{oc} – температура окружающей среды, принятая равной 25°C.

Объем и масса графитового слоя вычисляется по формуле:

$$V_r = \frac{\pi D^2}{4} \cdot h, \quad m_r = \rho \cdot V_r \quad (3)$$

где D – диаметр реактора, м.; h – высоты графита, м.



Тогда средняя температура графита определяется из выражения:

$$t_r = \frac{Q_0}{m_r \cdot c_{pr}} + t_{oc} \quad (4)$$

из таблицы 1 и рисунок 3, берем значения постоянных величин для графита $D = 0,1 \text{ м}$, $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$, $c_p = 800 \text{ Дж/кг}^\circ\text{C}$,

Подставляя в расчетную формулу значение мощности и постоянные величины, выводим следующие рабочие формулы:

$$W = 300 \text{ Вт}, \quad t_r = 0,024 \frac{\tau}{h} + 25 \quad (5)$$

$$W = 600 \text{ Вт}, \quad t_r = 0,048 \frac{\tau}{h} + 25 \quad (6)$$

$$W = 900 \text{ Вт}, \quad t_r = 0,072 \frac{\tau}{h} + 25 \quad (7)$$

Граничные условие по температуре $85^\circ\text{C} \leq t_r \leq 1300^\circ\text{C}$, по толщине графитового слоя $0,004 \text{ м} \leq h \leq 0,01 \text{ м}$, по времени нагрева $25 \leq \tau \leq 500 \text{ сек}$, Начальные условия при $\tau = 0 \quad t_r = t_{oc}$. Результаты теоретического расчета представлены в таблицах (3,4,5).

Температура изменяется в зависимости от высоты частей реактора: графит – медь – пиролизуемые материалы, идентично графику, показанному на рисунке 4.

При определении условия достаточности температуры для конкретного типа пиролиза, использовано уравнение теплопередачи Фурье.

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} (T_1 - T_2) \quad (8)$$

отсюда для графита

$$Q_r = \frac{\lambda}{\delta} (T_{1r} - T_{2r}) \quad (9)$$

для меди

$$Q_r = \frac{\lambda}{\delta} (T_{1m} - T_{2m}) \quad (10)$$

приравнявая $Q_r = Q_m$, получаем соотношение

$$(T_{1r} - T_{2r}) / (T_{1m} - T_{2m}) = \frac{\lambda_m}{(\delta)_m} (\delta)_r / \lambda_r \quad (11)$$

Согласно условие типа пиролиза T_{2m} принимает следующие значения 650°C , 800°C и 1000°C .

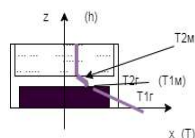


Рис. 4. К расчету определение температуры пиролиза.

В задаче дано распределение температуры на внутренней поверхности днища реактора T_{2m} и плотность теплового потока на поверхности T_{1r} для любого времени, что означает конкретности граничных условий 1^{го} и 2^{го} рода. Предварительный анализ расчета показал, что для покрытия днища гелиореактора, подходит графит, даже самым низким коэффициентом теплопроводности $35 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$ (с примесями около 3%). Расчет толщины графита h или $(\delta)_r$ определяем из уравнение (5).

$$(\delta)_r = [(T_{1r} - T_{2r}) / (T_{1m} - T_{2m})] * \frac{(\delta)_m}{\lambda_m} \lambda_r \quad (12)$$

Результаты расчета представлены в таблице 6. При этом принимаем температурный перепад для меди 20°C , тогда для низкотемпературного пиролиза 600°C , на границе медь и графит температура принимает значение 620°C (рабочая температура меди максимум 600°C). Задавая разные значения температуры поверхности графита, можно определить толщину графита.

Тепловая инерция системы характеризует устойчивость на изменения внешних факторов окружающей среды и основной роль играет в проектирование строительных объектов и технологических устройств.



Для расчета тепловой инерции материалов технологических устройств применяется формула

$$I = \sqrt{\rho c \lambda} \quad (13)$$

Она является свойством только применяемого материала, в зарубежной литературе она называется «коэффициент тепловой активности». Используя данные из таблицы 1, рассчитана тепловая инерция применяемых материалов и сведено в таблицу 7. Исследование тепловой инерции технологических устройств требует отдельной доработки. В целях подтверждения, расчетно-теоретических данных изготовлен экспериментальный стенд (Рисунок 6). Измерение температуры производится 4мя термоэлектрическими термометрами типа ТХА, предел измерения $-20-1300^{\circ}\text{C}$, с точностью $\pm 1,3^{\circ}\text{C}$ (ГОСТ 6616-94, ГОСТ 3044-84). Перед использованием они должны проверяться на достоверность показаний, с помощью опорных температур, наиболее известных веществ, в нашем случае дистиллированная вода, с тройной точкой 0°C и точкой кипения 98°C в нормальных условиях. Геометрические размеры частей стенда: Наружный диаметр реактора 100 мм, толщина графита 10 мм. Загрузка отходов хлопковых семян 50 г. Мощность электронагревателя регулируется с помощью автотрансформатора АР-10, предел до 10 Квт. Точки измерения термодатчиков: ТП1 в графите на высоте 5мм, ТП2 между слоями медь-графит, ТП3 теплоприемной части графита и ТП4 на поверхности меди, где происходит пиролиз. Все данные эксперимента, изменение температуры в зависимости времени и мощности сведено в таблицу (8,9). В схеме для контроля температуры, использован восьмиканальный термоконтроллер ДТМЕ08, инерционность 0,1с (Россия).

Параллельно с термодатчиками для измерения температуры поверхностей, применен пирометр MS-6530, предел измерения $50 - 537^{\circ}\text{C}$, $\pm 1,5\%$, время отклика 0,5 сек (Германия).

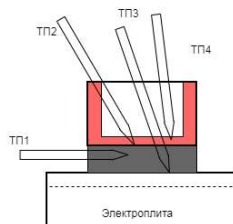


Рис. 6 Экспериментальный стенд для определения температурного поля между покрытием графит- медь и поверхностями приема-отдачи тепла.

Обсуждение и результаты.

На основе изложенной методики был выполнен инженерный расчёт стационарного температурного поля днища условного гелиореактора при различной толщине графитового покрытия и изменении времени нагрева. Расчёты проведены с использованием исходных данных, представленных в разделе «Материалы и методы», при значениях постоянной тепловой мощности.

Результаты расчёта температурного поля представлены в таблицах (3 – 5), для 300,600,900 Вт. В них приведены значения средней температуры днища гелиореактора при различных толщинах графитового слоя и диапазонах времени теплового воздействия (τ). Эти данные позволяют оценить влияние толщины термобарьерного покрытия на динамику нагрева реакционной поверхности и определить температурный диапазон процесса.

Таблица 3.

Расчётные значения температуры при различных толщинах графита и времени нагрева при $W=300\text{ Вт}$

№	h, м	τ , сек				
		25	50	100	150	200
1	0,004	175	325	625	925	1225
2	0,006	125	225	425	625	825
3	0,008	100	175	325	475	625
4	0,01	85	145	265	385	505



Таблица 4.

Расчётные значения температуры при различных толщинах графитового покрытия и времени нагрева при $W=600$ Вт

№	h, м	τ , сек				
		25	50	100	150	200
1	0,004	325	625	1225	-	-
2	0,006	225	425	825	1225	-
3	0,008	175	325	625	925	1225
4	0,01	145	265	505	745	985

Таблица 5.

Расчётные значения температуры при различных толщинах графитового покрытия и времени нагрева $W=900$ Вт

№	h, м	τ , сек				
		25	50	100	150	200
1	0,004	475	925	-	-	-
2	0,006	325	625	1225	-	-
3	0,008	250	475	925	-	-
4	0,01	205	385	745	1105	-

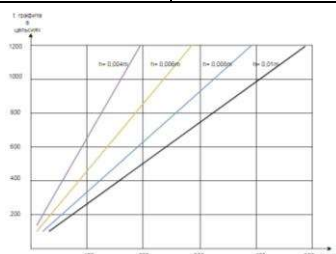


Рис.7 Зависимость температуры пиролиза от толщины слоя материала при различных временах теплового воздействия, $W = 300$ Вт.

Из анализа графика (рис. 7) видно, что с увеличением толщины слоя наблюдается существенное снижение температуры пиролиза. Это объясняется увеличением теплового сопротивления материала, что ограничивает скорость прогрева внутренней части слоя. При этом с ростом времени теплового воздействия ($\tau = 50\text{--}500$ с) температурные кривые постепенно выравниваются, что указывает на достижение квазистационарного температурного распределения в образце. Наибольшие значения температуры отмечаются при малых толщинах ($h=0,004\text{--}0,006$ м), где интенсивность теплопередачи максимальна. При дальнейшем увеличении толщины слоя до 0,01 м температура стабилизируется и слабо зависит от времени воздействия. Таким образом, определяющими факторами являются как геометрические размеры слоя, так и длительность теплового импульса. Для наглядного представления полученных зависимостей был построен график в трёхмерной системе координат (рисунок 9), демонстрирующий взаимосвязь исследуемых параметров.

Данный график наглядно демонстрирует, что с течением времени температура графита асимптотически стремится к некоторому установившемуся значению. При этом постоянная времени напрямую определяет скорость прогрева. Малые значения τ (50–100 с) соответствуют быстрому выходу на режим, в то время как большие значения τ (100–300с) характеризуют медленный, плавный нагрев. Толщина теплозащиты (h) определяет конечное, установившееся значение температуры графита. Чем больше h , тем ниже итоговая температура, что предотвращает термическую деструкцию.

В результате теоретического подхода получено уравнение (6) для расчета оптимальной толщины термозащитного слоя, который обеспечивает низкотемпературный гелиопиролиз отходов хлопковых семян. Из таблицы 6, определяем расчетную толщину термозащитного слоя 10 мм. Для средней и высокотемпературного пиролиза, материал реактора можно выбрать нержавеющей сталь 18ХГТ или другие жаропрочные материалы [9].





Таблица 6

Результаты расчета толщины графита при $T_{Г1} = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$

№	Температура пиролиза $^{\circ}\text{C}$	Перепад темпе. $T_{М2} - T_{М1}\text{ }^{\circ}\text{C}$	Перепад темпе. $T_{Г1} - T_{Г2}\text{ }^{\circ}\text{C}$	Толщина графита мм, $T_{Г1}=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$
1	525	20	455	8,38
2	550	20	430	7,92
3	575	20	405	7,46
4	600	20	380	7.30

Таблица 7

Расчет тепловой инерции предлагаемых материалов

№	Материал	Тепловая инерция, $\cdot 10^3 \text{ Дж/м}^2\text{K(сек)}^{0,5} [\text{кг/(сек)}^{2,5}\text{K}]$
1	Fe	12,80
2	Cu	38,67
3	C Графит	48,99
4	C+Si Карборунд	6,69

Таблица 8

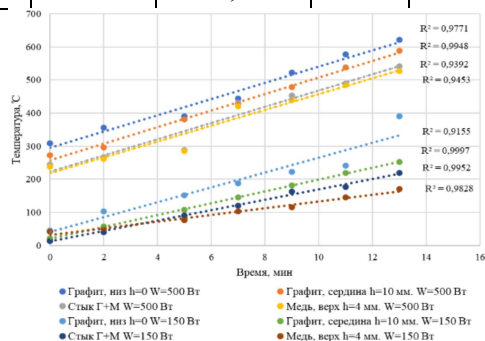
Экспериментальное исследование температур поверхностей покрытий графит-стык-медь, в зависимости от времени при $T_{oc} = 12,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W=150\text{ Вт}$.

№	τ мин	Графит, $h=10\text{ mm}$				Стык Г+М		Медь $h=4\text{ mm}$	
		Низ $h=0$		Середина $h/2$		ТП2 mV	$^{\circ}\text{C}$	Верх	
		ТП3 mV	$^{\circ}\text{C}$	ТП1 mV	$^{\circ}\text{C}$			ТП4 mV	$^{\circ}\text{C}$
1	0	1,82	45	0,81	21	1,8	14	1,6	41
2	2	4,23	103	2,40	58	2,38	40,4	2,02	49,5
3	5	6,15	151	4,50	108	3,26	91	3,06	76
4	7	7,71	188	6,00	145	5,31	120	4,13	103
5	9	9,10	222	7,41	182	5,42	162	4,79	116
6	11	9,81	242	8,93	220	6,03	177	6,00	145
7	13	15,98	390	10,22	253	7,32	219	6,93	171

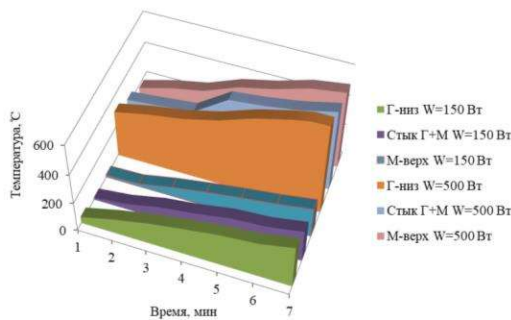
Таблица 9.

Экспериментальное исследование температур поверхностей покрытий графит-стык-медь, в зависимости от времени при $T_{oc} = 13,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W=500\text{ Вт}$

№	τ мин	Графит, $h=10\text{ mm}$				Стык Г+М		Медь $h=4\text{ mm}$	
		Низ $h=0$		Середина $h/2$		ТП2 mV	$^{\circ}\text{C}$	Верх	
		ТП3 mV	$^{\circ}\text{C}$	ТП1 mV	$^{\circ}\text{C}$			ТП4 mV	$^{\circ}\text{C}$
1	0	12,60	309	10,05	272	9,85	245	9,77	238
2	2	14,51	356	12,07	296	10,83	266	10,80	262
3	5	15,98	390	15,55	381	11,80	289	11,59	285
4	7	16,62	444	17,67	429	17,65	431	17,25	420
5	9	19,83	522	19,75	478	18,69	454	18,09	439
6	11	24,03	578	22,15	538	20,21	489	20,44	485
7	13	25,85	622	24,1	588	22,38	541	21,82	527



а)



б)

Рис. 8. А) График изменения температуры в зависимости W, h и τ после аппроксимации, б) 3D-модель изменение температуры в зависимости мощности, толщины термобарьера и время нагрева.



Расчет погрешности измерения температуры произвели по стандартной методике ГОСТ 8.207 и ISO GUM. Вероятная ошибка определяется суммарной погрешностью термопары и контроллера, а достоверность 0,95 обеспечивается через расширенную неопределенность с коэффициентом охвата k .

Термопара ТХА – тип К, по IEC 60584, погрешность по паспорту $\pm 1,3^{\circ}\text{C}$; Контроллер ДТМЕ08 с ошибкой $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$; Суммарная вероятностная погрешность $\Delta = 1,64^{\circ}\text{C}$; Достоверность результатов 0,95 при $k=2,5$ $u = 4,1^{\circ}\text{C}$; Ошибка при измерение конкретной точки $T_i \pm 4,1^{\circ}\text{C}$

Выводы и предложения

Критерием выбора теплобарьерных средств является данные, такие как теплопроводность, технологичность получения и применения, стоимость и долговечность использования.

Анализ экспериментальных данных, представленных в таблицах, показал чёткую зависимость скорости нагрева графита от времени задержки τ в диапазоне 0–600 с. Трёхмерная визуализация позволила наглядно отобразить взаимосвязь между временем выдержки, температурой нагрева и степенью пиролиза, выявив зоны максимальной активности реакции. Наблюдается тенденция к стабилизации степени разложения при $\tau \geq 400$ с, что указывает на существование оптимального времени воздействия солнечного излучения на графит для эффективного пиролиза. Полученные результаты демонстрируют ключевое влияние времени термического воздействия и температуры на кинетику гелиопиролиза и подтверждают целесообразность комплексного анализа параметров процесса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Кашин Д.С., Дергачева П.Е., Стехов П.А. Жаростойкие покрытия, наносимые шликерным методом // Защитные и функциональные покрытия. – 2018. – С. 45–58.
- [2]. Жаростойкие покрытия для защиты конструкционных материалов: труды 7-го Всесоюзного совещания по жаростойким покрытиям (г. Калинин, 20–23 мая 1975 г.). – Л.: Наука, 1977. – 311 с.
- [3]. Якубов С.И., Умидиллаев Дж.Х., Бузруков Р.И., Турдиев М.Ш. К вопросу теплопередачи двухслойного гелиопиролизного реактора // Материалы IV Международной научной конференции. – Ташкент: Ташкентский филиал РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2025. – С. 415.
- [4]. Пашков Е.И., Пермяков М.Б., Краснова Т.В. Защита теплотехнических агрегатов в агрессивной высокотемпературной среде строительными теплоизоляционными материалами // Вестник Евразийской науки. – 2021. – № 2.
- [5]. Кошкин В.К. и др. Нестационарный теплообмен. – Л.: Машиностроение, 1973. – 328 с.
- [6]. Михеенков Е.Л. Основы теории теплообмена. – Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева, 2007. – 96 с.
- [7]. Рахматов О.И., Абдурахмонова Н.К. Расчёт теплового баланса гелиотеплицы // Muqobil Energetika. – 2024. – № 1. – С. 45–52.
- [8]. Презентация проектов, направленных на обеспечение экологической устойчивости Узбекистана [Электронный ресурс] // President.uz. – 21.10.2024. – Режим доступа: <https://president.uz>
- [9]. Матвеев П.В., Будиновский С.А., Мубояджян С.А. Защитные жаростойкие покрытия для сплавов на основе интерметаллидов никеля // Авиационные материалы и технологии. – 2013. – № S2. – С. 39–43.
- [10]. Майорова И.А. Математическое моделирование процесса теплопереноса и оптимизации конструкции многослойного теплозащитного покрытия // Авиационные материалы и технологии. – 2013. – № S2. – С. 17–23.
- [11]. Вахидов Э.А., Нуркулов Ф.Н., Саидов А.Х., Нарзуллаева А.М. Приготовление алюмофосфатных клеев и их спектральные и термические анализы // Universum: Технические науки. – 2024. – № 2(119).

