

Гайдукова О.С., Стрижак П.А.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ЗАЖИГАНИЯ ГЕЛЕОБРАЗНОГО ТОПЛИВА ПРИ РАЗНЫХ СХЕМАХ НАГРЕВА*

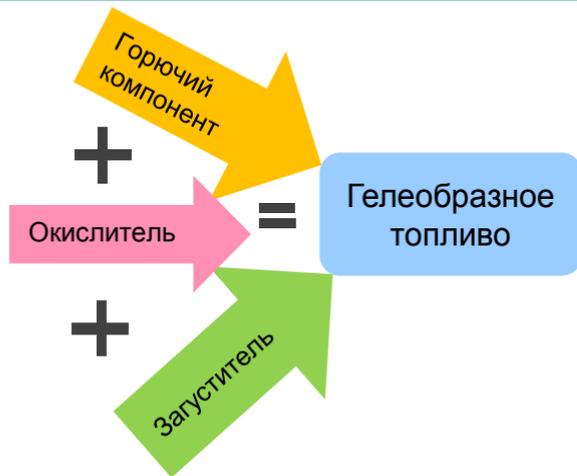
*Исследование поддержано грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации,
Соглашение № 075-15-2020-806 (договор № 13.1902.21.0014).

Всероссийская научная конференция
«XII Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике»

Сочи
25-27 октября 2021 г.

Гелеобразные топлива – перспективные топлива, сочетающие преимущества твердых и жидких конденсированных веществ [1].

Приготовление гелеобразных топлив из эмульсий на основе горючих жидких и мелкодисперсных твердых отходов является перспективным направлением для экологически и экономически эффективной их утилизации по месту на объектах, отдаленных от крупных промышленных центров [2].



Авиакосмическая отрасль



Нефтегазовая отрасль



Теплоэнергетика



Регионы Крайнего Севера



Ближний и дальний космос

[1] Natan B., Rahimi S. Combustion of Energetic Materials (Eds.: K.K. Kuo, L.T. DeLuca). Begell House, 2002, 172–194.

[2] Манжай В.Н., Фуфаева М.С. // Химия и технология топлив и масел 2015 (5) 38–41.

Актуальность

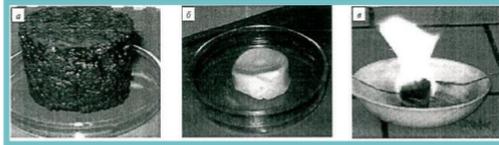
- Достаточно высокая теплотворная способность.
- Устойчивы к хранению и транспортировке при низких температурах и повышенном давлении.
- Менее высокие показатели пожарной опасности из-за минимизации потерь на испарение и утечки при хранении.
- Меньшее негативное воздействие на окружающую среду по сравнению с типичными видами топлив.



Основные направления исследований в рамках тематики гелеобразных топлив [1]:

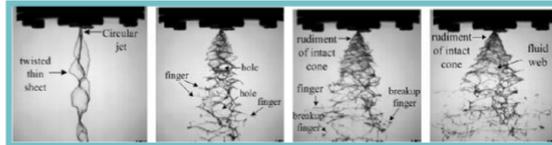
■ Приготовление топливных составов

Dove M.F.A. et al.
Munjal N.L. et al.
Varma M.
Varghese T.L. et al.



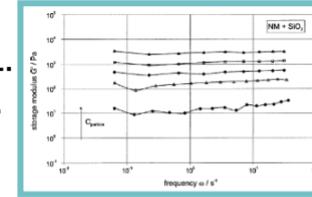
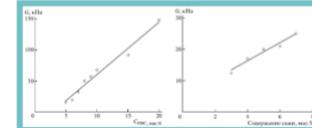
■ Транспортировка и распыление

Rahimi S. and Natan B.
Chojnacki K.T.
and Feikema D.A.
Green J.M. et al.
Mansour A. and Chigier N.
Urbon B.S., Guglielmi J.D.



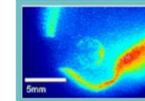
■ Реологические характеристики

Манжай А.С.
Фуфаева Л.К.
Gupta B.L. et al.
Rahimi S. and Natan B.
Rapp D.C. and Zurawski R.L.
Wickman J.H. and James M.



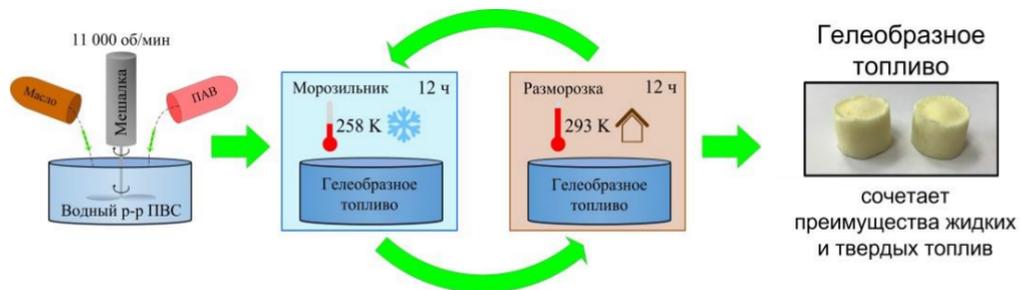
■ Горение

Глушков Д.О.
Нигай А.Г.
Williams F.A.
Bhatia R. and Sirignano W.A.
Peleg I. and Timnat Y.M.
Palaszewski B. and Zakany J.S.
Szekeley G.A. and Faeth G.M.
Wong W. and Turns S.R.



Цель работы

Исследование предельных условий зажигания типичных гелеобразных топлив с учетом группы взаимосвязанных процессов тепломассопереноса, фазовых превращений и химического реагирования при кондуктивной, конвективной и радиационной схемах нагрева и отрицательной начальной температуре топлива (203 К).



Экспериментальная методика исследования процесса зажигания гелеобразных топлив

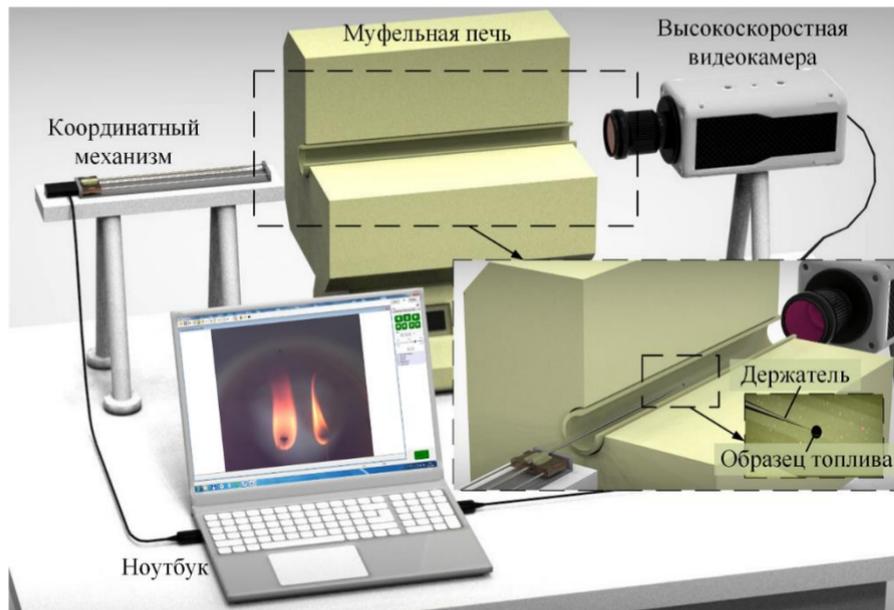


Рисунок 1. Схема экспериментального стенда исследования процесса зажигания гелеобразных топлив

- **Муфельная печь LOIP LF-50/500-1200** для генерации высокотемпературной воздушной среды.

Размер керамической трубки: диаметр 50 мм, длина 500 мм; температуры 293–1473 К; встроенная термопара HCX XA, погрешность ± 1 К.



- **Высокоскоростная видеокамера Phantom v411** для регистрации процессов в течение индукционного периода.

Скорость записи 4200 к/с при максимальном разрешении 1280×800 пикс.; размер пикселя 20 мкм; глубина изображения 12 бит; память 16 Гб; минимальная экспозиция 1 мкс; автоматический триггер по изображению.



- **ПО Tema Automotive** для определения времени задержки зажигания (t_d).

Значения t_d определялись как разница между двумя моментами по времени [13]: начало нагрева топлива и его газофазное зажигание. Систематическая погрешность не более 0.5%. Случайная погрешность серии из 5–10 экспериментов не более 10%.



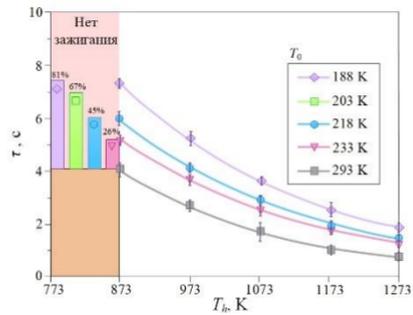
Результаты экспериментальных исследований



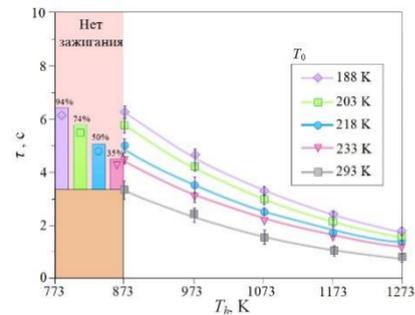
Рисунок 2. Кадры зажигания образцов гелеобразного топлива с разной начальной температурой при $T_g = 1073 \text{ K}$

Табл. 1. Составы гелеобразных топлив

№ состава	Концентрации компонентов, % об.			
	Водный раствор ПВС (5% масс.)	Водный раствор ПВС (10% масс.)	Масло И-40А	ПАВ
1	48	–	50	2
2	38	–	60	2
3	–	58	40	2
4	–	48	50	2
5	–	38	60	2

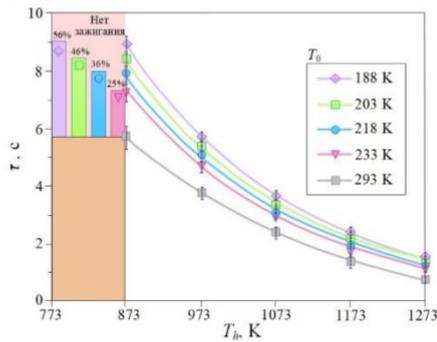


(а) состав № 1 (50% масло)

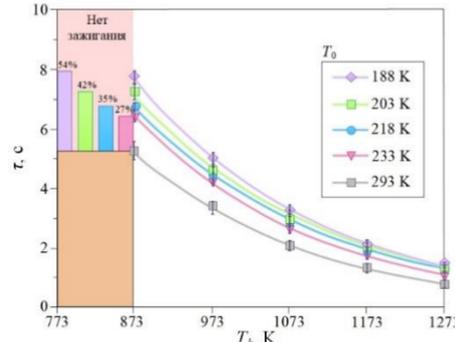


(б) состав № 2 (60% масло)

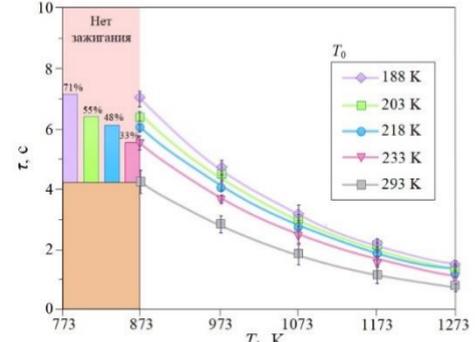
Рисунок 3. Времена задержки загорания гелеобразного топлива на основе 5%-ного водного раствора ПВС при разных начальных температурах образцов: (а) – состав № 1 (48% водный раствор ПВС + 50% масло + 2% ПАВ); (б) – состав № 2 (38% водный раствор ПВС + 60% масло + 2% ПАВ)



(а) состав № 3 (40% масло)



(б) состав № 4 (50% масло)



(в) состав № 5 (60% масло)

Рисунок 4. Времена задержки загорания гелеобразного топлива на основе 10%-ного водного раствора ПВС при разных начальных температурах образцов: (а) – состав № 3 (58% водный раствор ПВС + 40% масло + 2% ПАВ); (б) – состав № 4 (48% водный раствор ПВС + 50% масло + 2% ПАВ); (в) – состав № 5 (38% водный раствор ПВС + 60% масло + 2% ПАВ)

Зажигание гелеобразного топлива при разных схемах нагрева

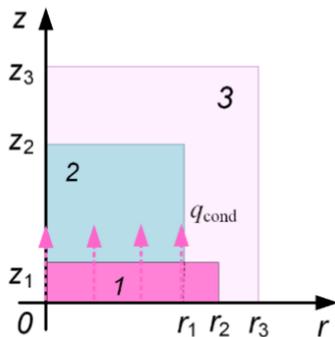


Рисунок 5. Область решения задачи теплопереноса при кондуктивном нагреве в соответствии с условиями эксперимента: 1 – нагревающая поверхность; 2 – образец топлива; 3 – воздух

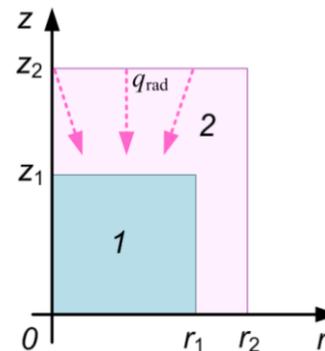


Рисунок 6. Схема области решения задачи теплопереноса при радиационном нагреве: 1 – образец топлива; 2 – воздух

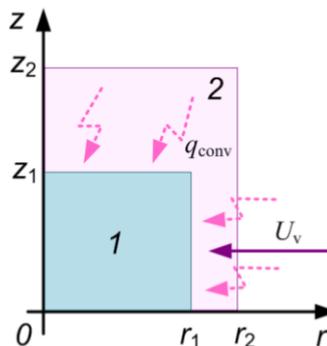


Рисунок 7. Схема области решения задачи теплопереноса при конвективном нагреве: 1 – образец топлива; 2 – воздух

Зажигание гелеобразного топлива при разных схемах нагрева

Таблица 2. Параметры для моделирования процессов зажигания гелеобразного топлива

Константа	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Энергия активации реакции окисления паров горючего	E_a	$60 \cdot 10^3$	Дж/моль
Предэкспоненциальный множитель реакции окисления паров горючего	k_0	$8 \cdot 10^1$	s^{-1}
Тепловой эффект испарения горючего	Q_{eo}	$38 \cdot 10^6$	Дж/кг
Тепловой эффект испарения окислителя	Q_{ef}	$0.14 \cdot 10^6$	Дж/кг
Массовая скорость испарения топлива	W_{ef}	$25 \cdot 10^{-3}$	кг/(м ² ·с)
Массовая скорость испарения окислителя	W_{eo}	$15.3 \cdot 10^{-3}$	кг/(м ² ·с)
Тепловой эффект испарения загустителя	Q_{ispz}	$0.26 \cdot 10^6$	Дж/кг
Коэффициент диффузии	D	$7.83 \cdot 10^{-5}$	м ² /с

для парогововой смеси ($0 < r < r_1$, $z_1 < z < z_2$, $r_1 < r < r_L$, $0 < z < z_2$):

уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} = \omega;$$

уравнение движения парогововой смеси:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + u \frac{\partial \omega}{\partial r} + w \frac{\partial \omega}{\partial z} = v_2 \left[\frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right] + \beta g \frac{\partial T_2}{\partial z};$$

уравнение энергии для парогововой смеси:

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau} + u \frac{\partial T_2}{\partial r} + w \frac{\partial T_2}{\partial z} = a_2 \left[\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right];$$

уравнение диффузии паров горючего:

$$\frac{\partial C_1}{\partial \tau} + u \frac{\partial C_1}{\partial r} + w \frac{\partial C_1}{\partial z} = D_{12} \left[\frac{\partial^2 C_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_1}{\partial z^2} \right];$$

уравнение баланса для парогововой смеси:

$$C_f + C_g = 1;$$

уравнение теплопроводности для топлива ($0 < r < r_1$, $0 < z < z_1$):

$$\frac{\partial T_1}{\partial \tau} = a_1 \left[\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right].$$

Начальные условия: $T = T_h$ при $0 < r < r_L$, $0 < z < z_1$; $T = T_{jc}$ при $0 < r < r_1$, $z_1 < z < z_2$

$T = T_a$, $C_f = 0$, $\psi = 0$, $\omega = 0$ при $0 < r < r_1$, $z_2 < z < z_3$, $r_1 < r < r_L$, $z_1 < z < z_3$.

$$r = 0, r = r_L, 0 < z < z_1 \quad \frac{\partial T_h}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial C_f}{\partial r} = 0;$$

$$r = 0, z_1 < z < z_2, \quad \frac{\partial T_f}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial C_f}{\partial r} = 0;$$

$$r = r_1, z_1 < z < z_2, \quad -\lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial r} - q_{cond} = -\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial r}; \quad \rho_{12} D \frac{\partial C_f}{\partial r} = W_{ef}; \quad \frac{\partial \psi}{\partial r} = \frac{W_{ef}}{\rho_{12}};$$

$$r = 0, r = r_L, z_2 < z < z_1, \quad \frac{\partial T_a}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial^2 C_f}{\partial r^2} = 0;$$

$$z = 0, 0 < r < r_L, \quad \frac{\partial T_h}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial C_f}{\partial z} = 0;$$

$$z = z_1, 0 < r < r_1 - \lambda_h \frac{\partial T_h}{\partial z} - Q_{ef} W_{ef} - Q_{eo} W_{eo} = -\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial z}; \quad \rho_{12} D \frac{\partial C_f}{\partial z} = W_{ef};$$

$$z = z_1, r_1 < r < r_L, -\lambda_h \frac{\partial T_h}{\partial z} - Q_{ef} W_{ef} - Q_{eo} W_{eo} = -\lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial z}; \quad \frac{\partial C_f}{\partial z} = 0;$$

$$z = z_2, 0 < r < r_1, -\lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial z} - q_{cond} = -\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial z}; \quad \rho_{12} D \frac{\partial C_f}{\partial z} = W_{ef}; \quad \frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{W_{ef}}{\rho_{12}};$$

$$z = z_L, 0 < r < r_L, \quad \frac{\partial T_a}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial^2 C_f}{\partial z^2} = 0.$$

Краевые условия при
радиационном нагреве

Начальные условия: $T=T_1$ при $0 < r < r_1$, $0 < z < z_1$; $T=T_2$, $C_f=0$, $\psi=0$, $\omega=0$

при $0 < r < r_1$, $z_1 < z < z_2$, $r_1 < r < r_L$, $z_1 < z < z_2$.

$$r = 0, 0 < z < z_1, \frac{\partial T_f}{\partial r} = 0; \frac{\partial C_f}{\partial r} = 0;$$

$$r = r_1, 0 < z < z_1, -\lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial r} - q_{\text{rad}} - Q_{\text{ef}} W_{\text{ef}} - Q_{\text{co}} W_{\text{co}} = -\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial r}; \rho_{12} D \frac{\partial C_f}{\partial r} = W_{\text{ef}}; \frac{\partial \psi}{\partial r} = \frac{W_{\text{ef}}}{\rho_{12}};$$

$$r = 0, r = r_L, z_1 < z < z_2, \frac{\partial T_a}{\partial r} = 0; \frac{\partial^2 C_f}{\partial r^2} = 0;$$

$$z = 0, 0 < r < r_1, \frac{\partial T_f}{\partial z} = 0; \frac{\partial C_f}{\partial z} = 0;$$

$$z = 0, r_1 < r < r_L, \frac{\partial T_a}{\partial z} = 0; \frac{\partial C_f}{\partial z} = 0;$$

$$z = z_1, 0 < r < r_1, -\lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial z} - q_{\text{rad}} - Q_{\text{ef}} W_{\text{ef}} - Q_{\text{co}} W_{\text{co}} = -\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial z}; \rho_{12} D \frac{\partial C_f}{\partial z} = W_{\text{ef}}; \frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{W_{\text{ef}}}{\rho_{12}};$$

$$z = z_1, 0 < r < r_L, \frac{\partial T_a}{\partial z} = 0; \frac{\partial^2 C_f}{\partial z^2} = 0;$$

$$q_{\text{rad}} = \sigma \varepsilon T_2^4.$$

Краевые условия при
конвективном нагреве

Начальные условия: $T=T_1$ при $0 < r < r_1$, $0 < z < z_1$; $T=T_2$, $C_f=0$, $\psi=0$, $\omega=0$

при $0 < r < r_1$, $z_1 < z < z_2$, $r_1 < r < r_L$, $z_1 < z < z_2$.

$$r = 0, 0 < z < z_1, \frac{\partial T_f}{\partial r} = 0; \frac{\partial C_f}{\partial r} = 0;$$

$$r = r_1, 0 < z < z_1, -\lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial r} - Q_{\text{ef}} W_{\text{ef}} - Q_{\text{co}} W_{\text{co}} = -\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial r}; \rho_{12} D \frac{\partial C_f}{\partial r} = W_{\text{ef}}; \frac{\partial \psi}{\partial r} = \frac{W_{\text{ef}}}{\rho_{12}};$$

$$r = 0, r = r_L, z_1 < z < z_2, -\lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial r} = q_{\text{conv}}; \frac{\partial^2 C_f}{\partial r^2} = 0; \frac{\partial \psi}{\partial r} = Uv;$$

$$z = 0, 0 < r < r_1, \frac{\partial T_f}{\partial z} = 0; \frac{\partial C_f}{\partial z} = 0;$$

$$z = 0, r_1 < r < r_L, \frac{\partial T_a}{\partial z} = 0; \frac{\partial C_f}{\partial z} = 0;$$

$$z = z_1, 0 < r < r_1, -\lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial z} - Q_{\text{ef}} W_{\text{ef}} - Q_{\text{co}} W_{\text{co}} = -\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial z}; \rho_{12} D \frac{\partial C_f}{\partial z} = W_{\text{ef}}; \frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{W_{\text{ef}}}{\rho_{12}};$$

$$z = z_1, 0 < r < r_L, -\lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial z} = q_{\text{conv}}; \frac{\partial^2 C_f}{\partial z^2} = 0; \frac{\partial \psi}{\partial z} = Uv.$$

$$q_{\text{conv}} = \alpha(T_2 - T_1).$$

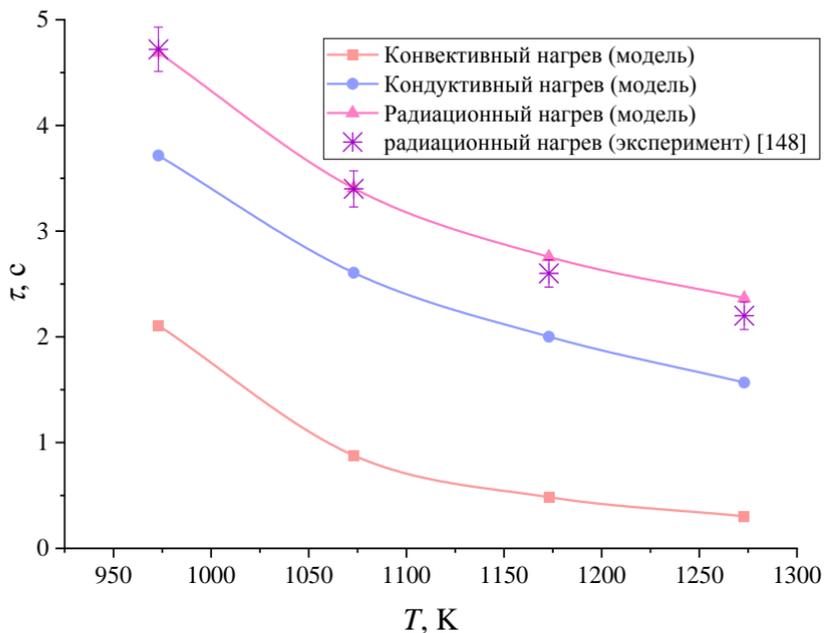


Рисунок 24. Теоретические и экспериментальные зависимости времен задержки зажигания τ гелеобразного топлива от температуры разогретого воздуха T в условиях конвективного, кондуктивного и радиационного нагрева

Табл. 11. Времена задержки зажигания гелеобразного топлива при радиационном нагреве при варьировании значения коэффициента излучения

T , K	$\epsilon=0.85$	$\epsilon=0.90$	$\epsilon=0.95$	$\epsilon=0.99$
873	8.776	8.776	8.766	8.763
973	4.691	4.690	4.688	4.688
1073	3.407	3.406	3.405	3.405
1173	2.757	2.756	2.756	2.756
1273	2.366	2.366	2.366	2.366

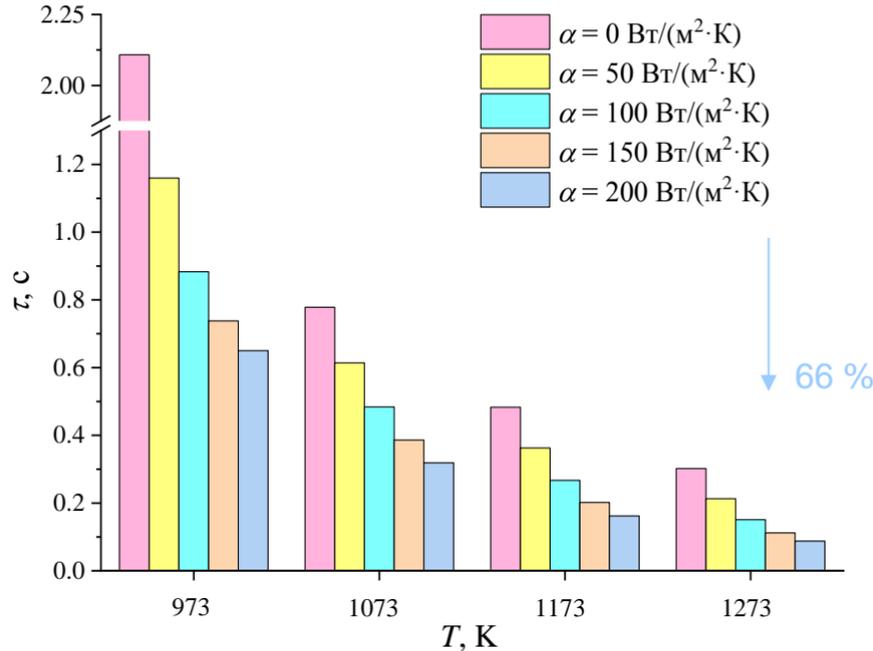


Рисунок 25. Теоретическая зависимость времени задержки зажигания τ от температуры нагрева T при варьировании коэффициента теплообмена α в условиях конвективного нагрева.

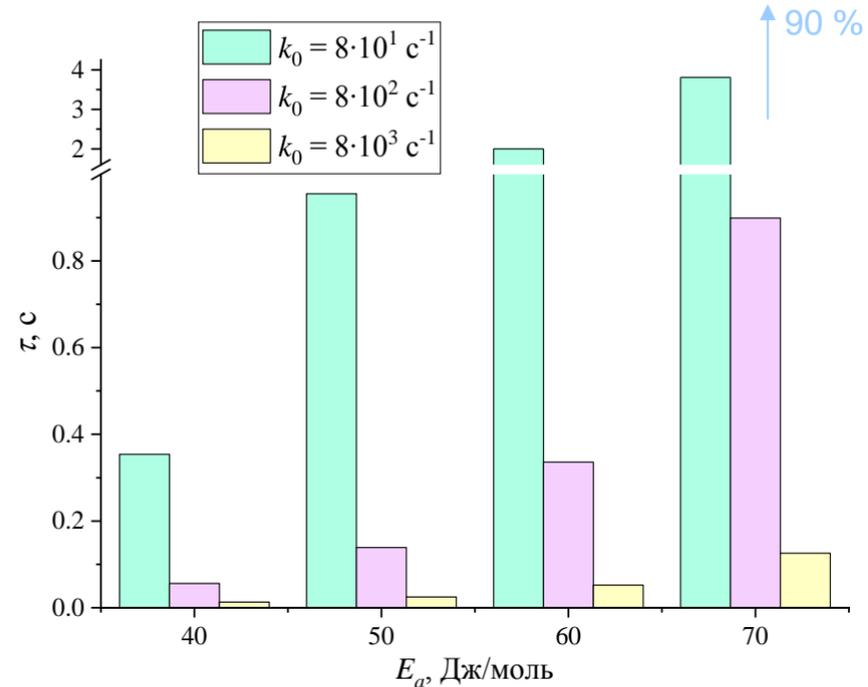
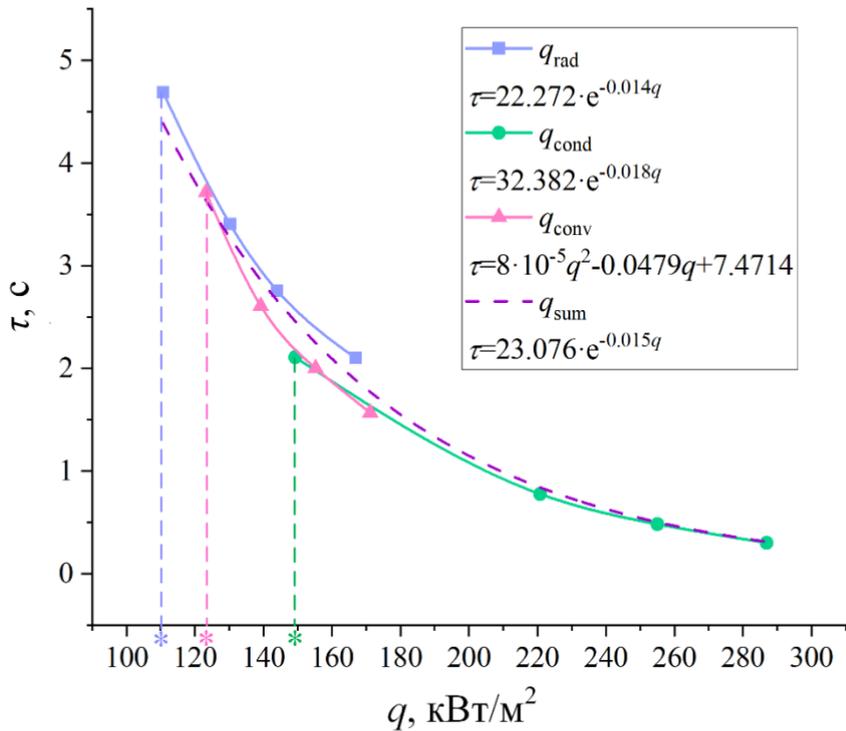


Рисунок 26. Теоретическая зависимость времени задержки зажигания τ от энергии активации реакции окисления паров горючего E_a при варьировании предэкспоненциального множителя реакции окисления k_0 в условиях кондуктивного нагрева ($T=1173 \text{ К}$)



Радиационный нагрев - 110 кВт/м²
 Конвективный нагрев - 149 кВт/м²
 Кондуктивный нагрев - 123 кВт/м²

Рисунок 27. Плотности теплового потока при радиационном, конвективном и кондуктивном зажигании гелеобразного топлива ($T_0 = 203$ К) при температурах нагрева 973–1273 К и аппроксимационные выражения для времен задержки зажигания (* – предельная плотность теплового потока, при которой происходит зажигание топлива)

Основные результаты и выводы

1. Изученные экспериментально закономерности взаимосвязанных процессов теплопереноса, фазовых превращений и химического реагирования позволили сформулировать **физические и математические модели** зажигания гелеобразного топлива для проведения исследований в условиях, типичных для энергетических приложений и двигателей различных установок.
2. Разработаны **физические и математические модели** зажигания гелеобразного топлива за счет нагрева с доминированием **конвективного, радиационного, кондуктивного** теплообмена, которые позволили установить зависимости времени задержки зажигания от температуры нагрева в диапазоне, существенно превышающем допустимые в экспериментах и соответствующие перспективным топливным технологиям.
3. В условиях **радиационного нагрева** наблюдаются максимальные времена задержки зажигания гелеобразного топлива и составляют **2.366–4.690 с**, при **кондуктивном нагреве** времена задержки зажигания – **1.568–3.715 с** при температуре нагрева 973–1273 К. Минимальные времена задержки зажигания соответствуют условиям **конвективного нагрева** и изменяются **от 0.302 до 2.108 с** при аналогичных температурах.
4. Вычислены значения **предельных плотностей теплового потока**, при которых происходит устойчивое зажигание гелеобразных топлив. Для гелеобразного топлива плотность теплового потока составляет : **при радиационном нагреве – 110 кВт/м²; при конвективном нагреве – 149 кВт/м²; при кондуктивном нагреве – 123 кВт/м².**
5. Получены **аппроксимационные выражения** для зависимостей времени задержки зажигания от всех исследованных факторов, которые используются при определении взаимосвязей между основными и второстепенными исходными параметрами, и характеристиками процесса инициирования гелеобразного топлива.

Спасибо за внимание!