

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОГРАФИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛАМЕНИ ПРИ ГОРЕНИИ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ ТОПЛИВ И СВЯЗЬ ПУЛЬСАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ С МАСШТАБАМИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Лобода Е.Л.¹, Матвиенко О.В.¹, Агафонцев М.В.¹, Рейно В.В.²

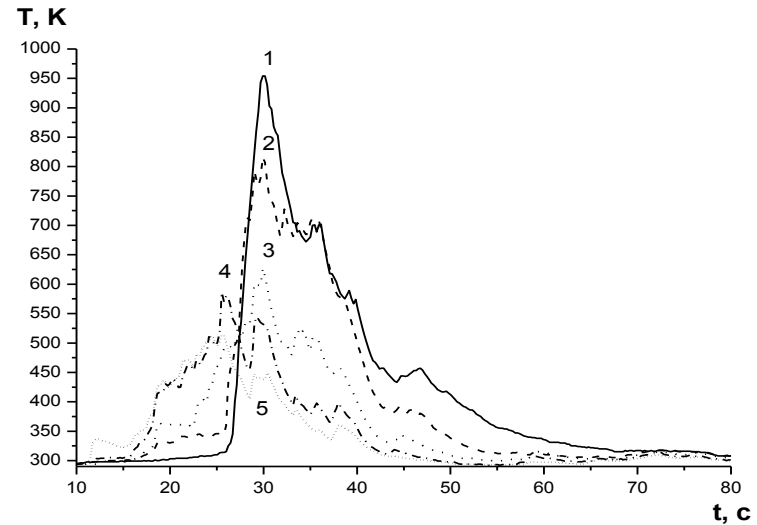
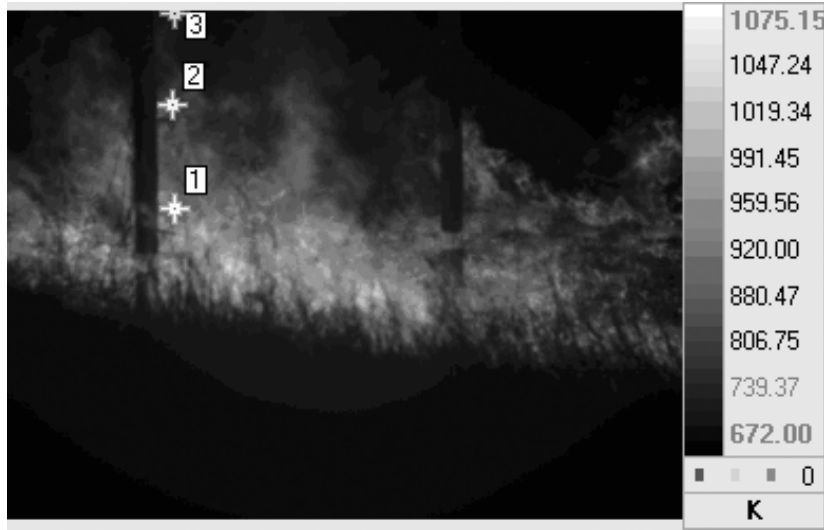


¹ Томский государственный университет

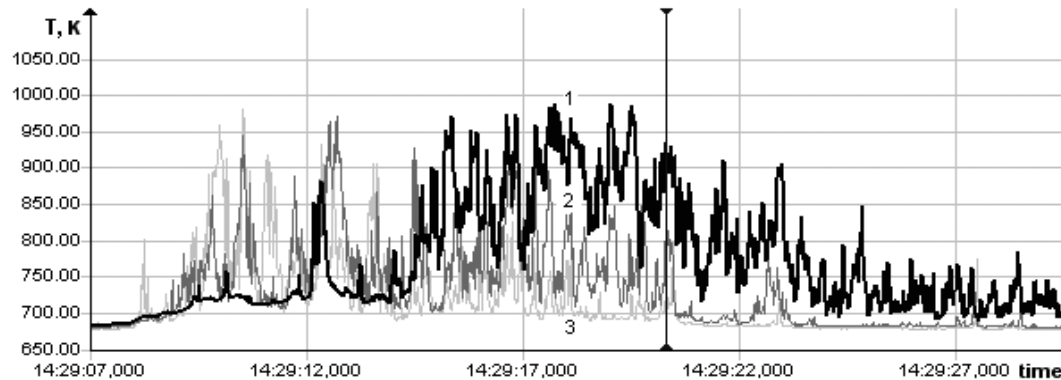


² Институт оптики атмосферы
имени В.Е. Зуева СО РАН

Натурные экспериментальные исследования распространения степных и полевых пожаров



a



b

Рис. 1. Термограмма (a), изменение температур во фронте пожара в точках 1, 2, 3 (b) изменение температур во фронте пожара по зарегистрированным показаниям термопар и изменение температур по данным, полученным с тепловизора JADE J530SB (c)

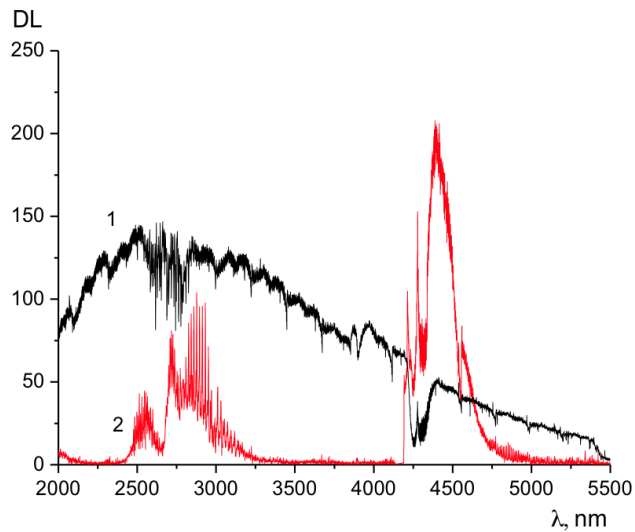


Рис. 2. Спектр пламени, образующегося при горении пропан-бутановой смеси

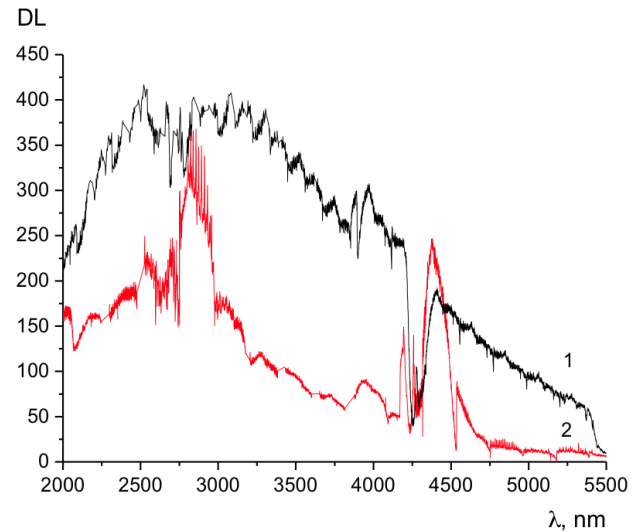


Рис. 3. Спектр пламени, образующегося при горении керосина

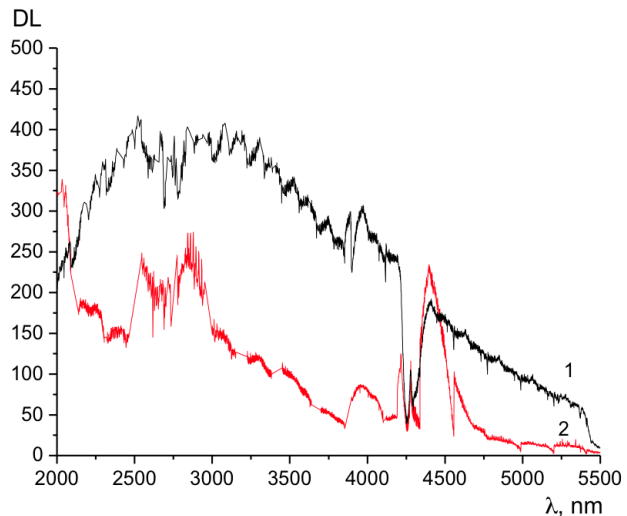


Рис. 4. Спектр пламени, образующегося при горении дизтоплива

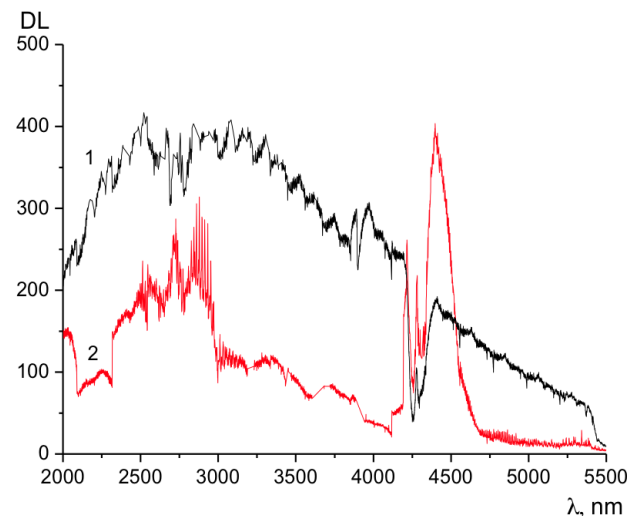


Рис. 5. Спектр пламени, образующегося при горении бензина

Таблица 1. Значения $\bar{\tau}_f$ пламени, образующегося при горении растительных горючих материалов, для различных спектральных интервалов.

Спектральный интервал	$T_{вв}, K$	Число слоев пламени	$\bar{\tau}$	$\bar{\tau} \pm \Delta\tau$	σ
2.5-2.7 мкм	1200	1	0.638	0.619-0.656	0.0316
	1300	2	0.585	0.561-0.608	0.0206
	1300	3	0.686	0.662-0.709	0.0242
2.64-3.25 мкм	1300	1	0.974	0.966-0.982	0.0081
		2	0.982	0.974-0.989	0.0074
4-5 мкм	1300	1	0.024	0.013-0.034	0.0106
		2	0		
		3	0		
4.35 (полоса пропускания 180 нм)	1300	1	0		
		2	0		
		3	0		
3.1-3.3 мкм	1300	1	0.626	0.608-0.644	0.0185
3.7-3.9 мкм	1300	1	0.916	0.906-0.926	0.0102
		2	0.92	0.911-0.929	0.0089

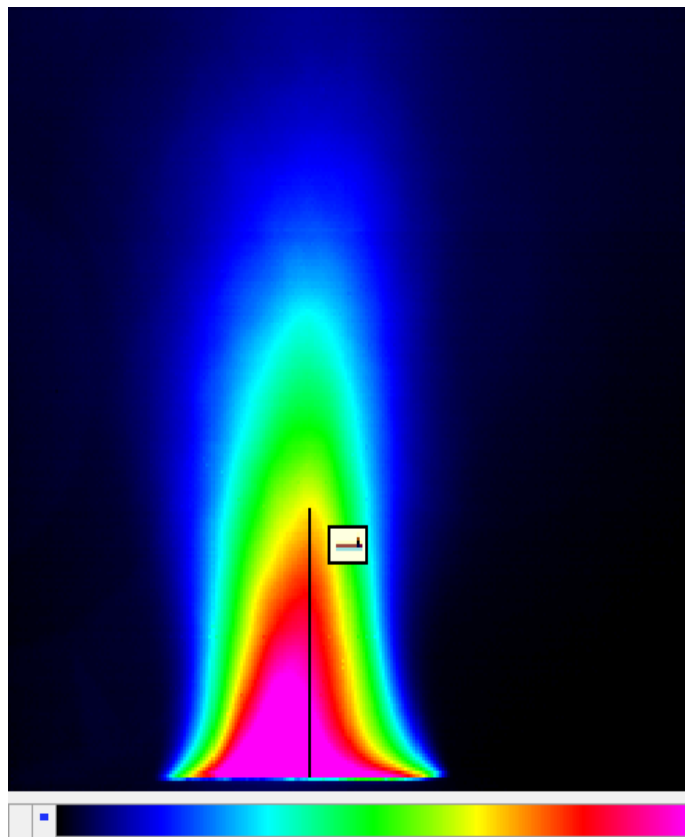


Рис. 6. Осредненная по времени термограмма факела пламени при горении спирта.

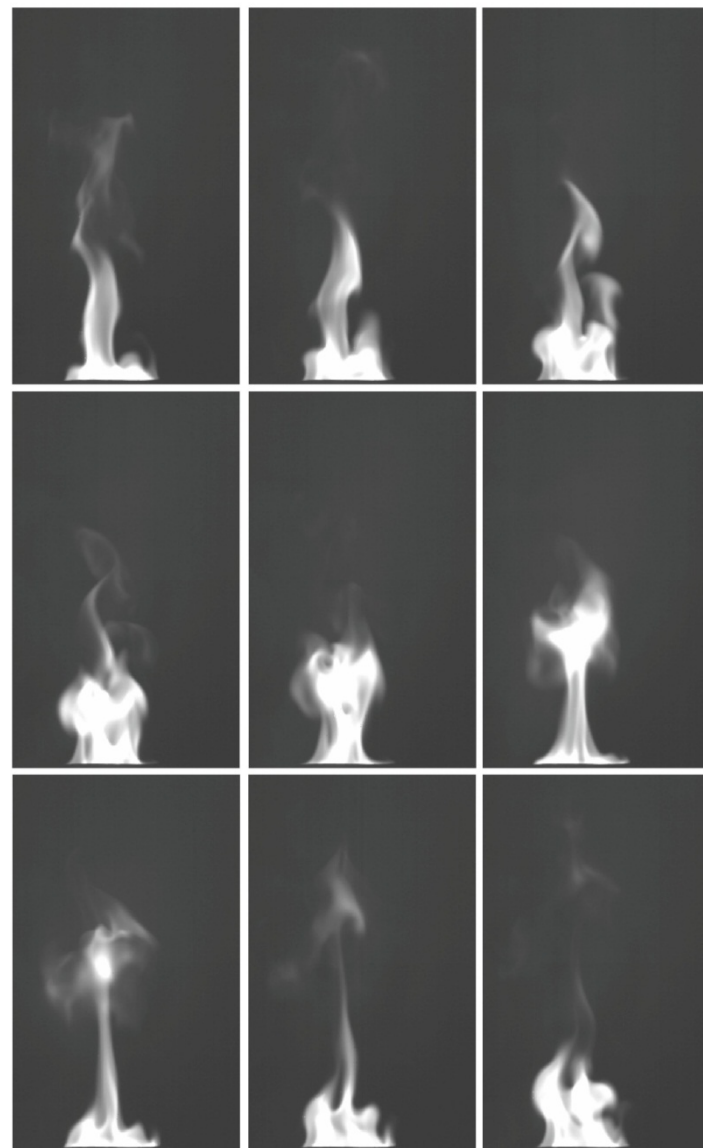


Рис. 7. Последовательность мгновенных термограмм при горении спирта.

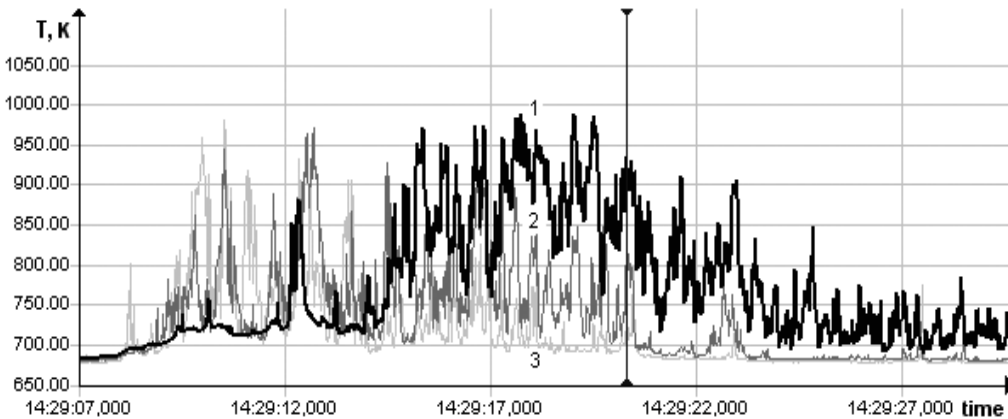


Рис. 8. Изменение температуры в пламени.

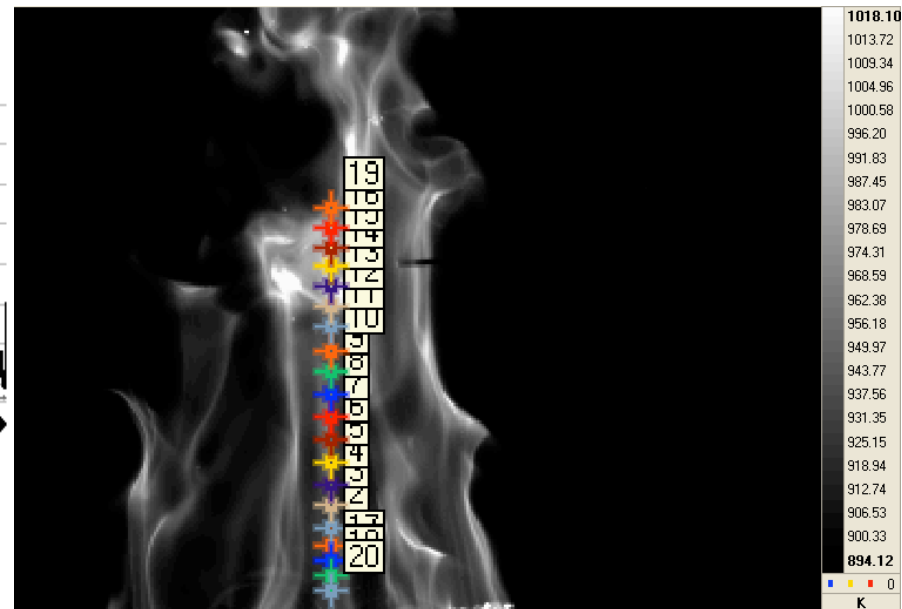


Рис. 9. Термограмма факела пламени, полученная на тепловизоре JADE J530SB в спектральном диапазоне $2,5 \div 2,7 \mu\text{m}$, время экспозиции кадра $64 \mu\text{s}$.

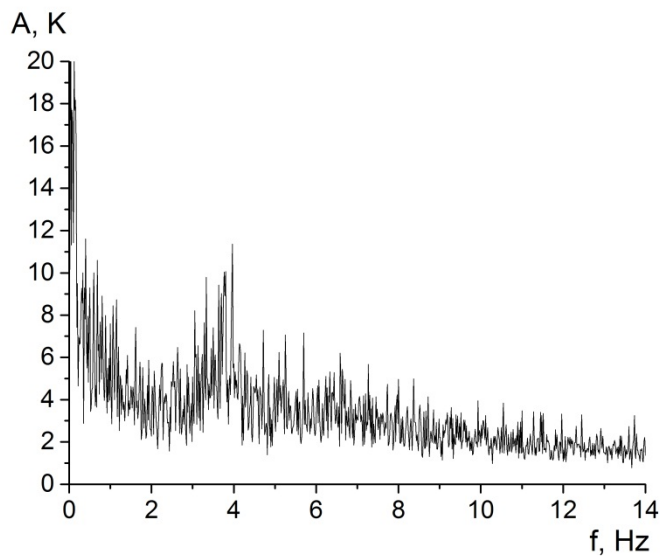


Рис. 10. Спектр изменения температуры в пламени при горении дизельного топлива

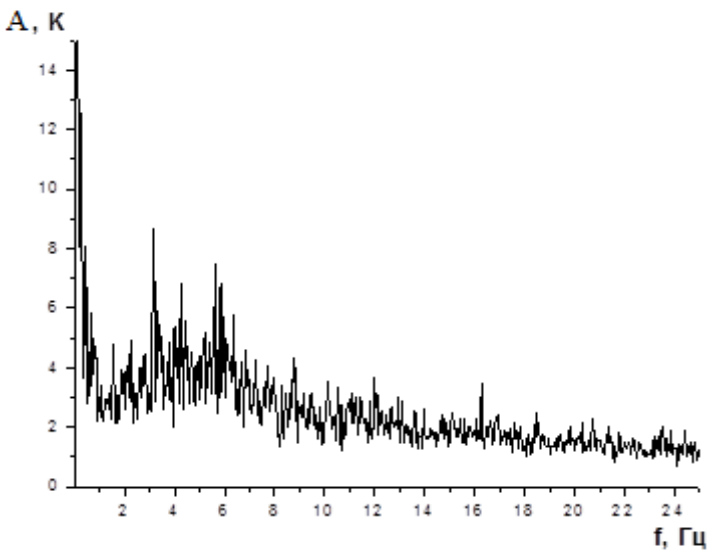


Рис. 11. Спектр изменения температуры в пламени при горении растительных горючих материалов по данным тепловизора

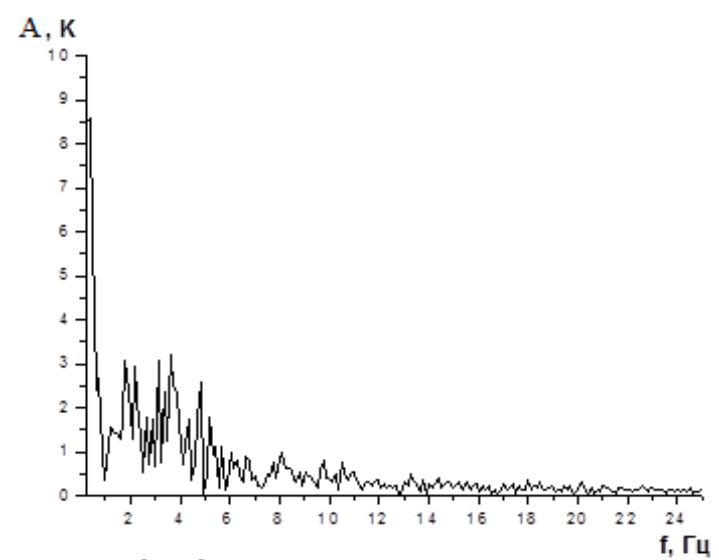


Рис. 12. Спектр изменения температуры в пламени при горении растительных горючих материалов по данным тепловизора

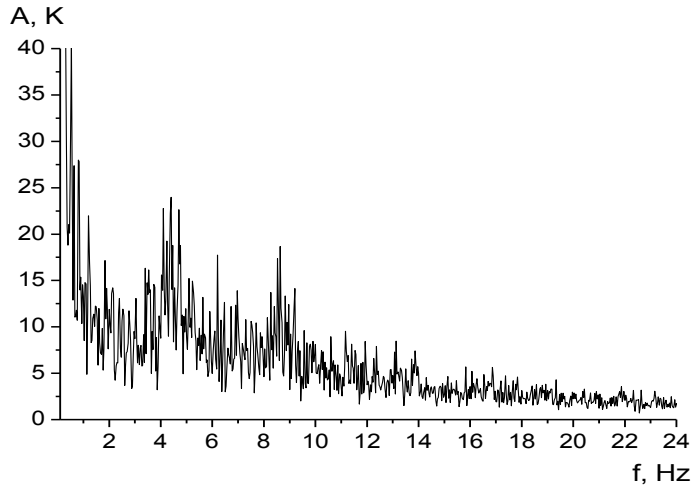


Рис. 13. Спектр изменения температуры в пламени при горении бензина топлива по данным тепловизора

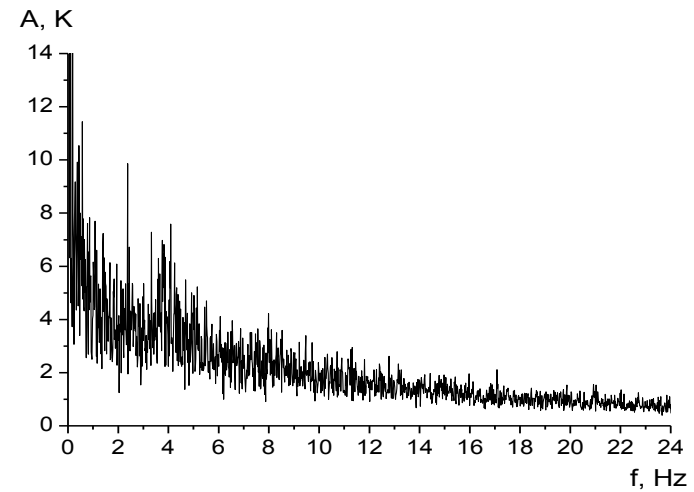


Рис. 14. Спектр изменения температуры в пламени при горении керосина по данным тепловизора

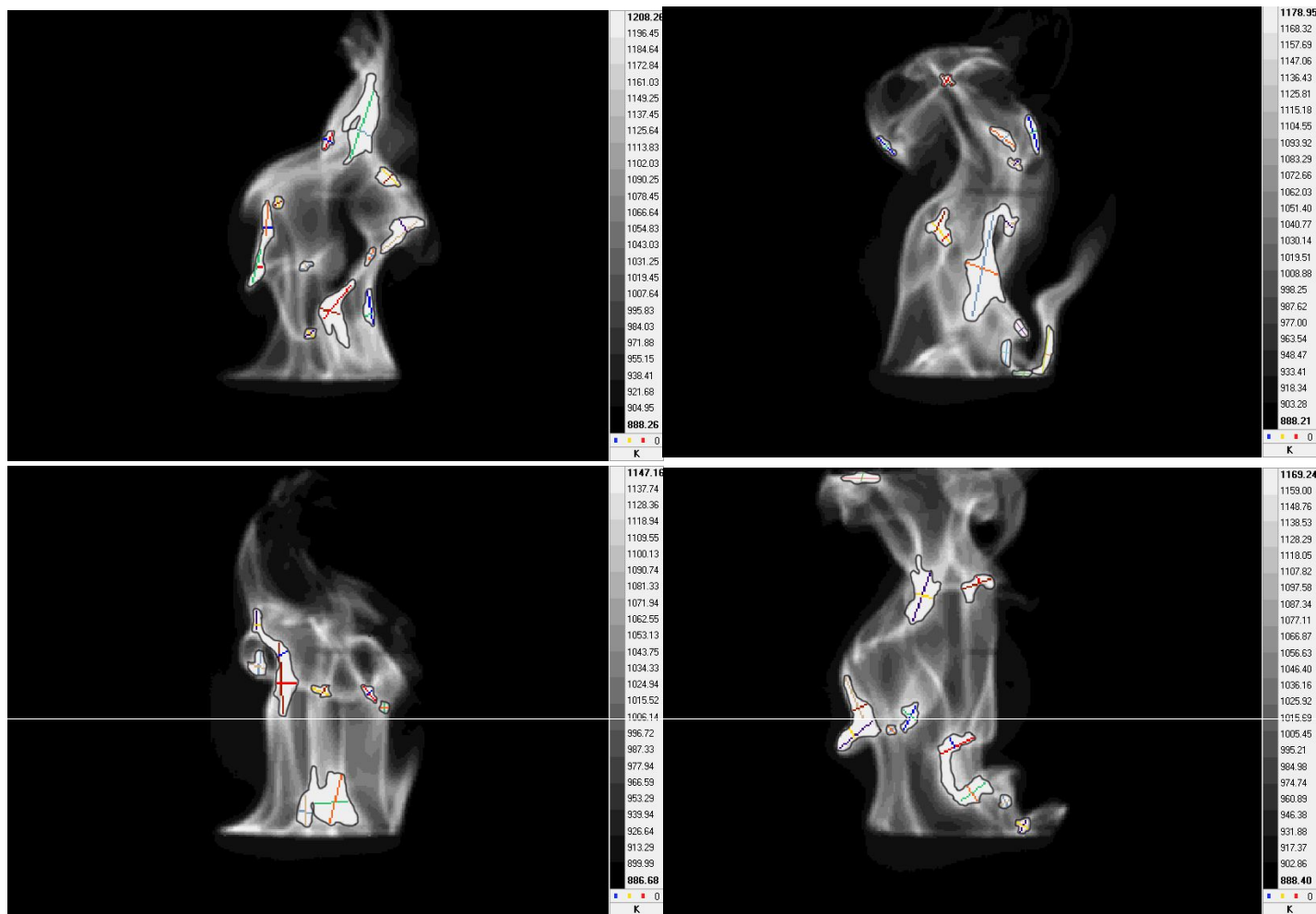


Рис. 15. Мгновенные термограммы пламени горения дизельного топлива.

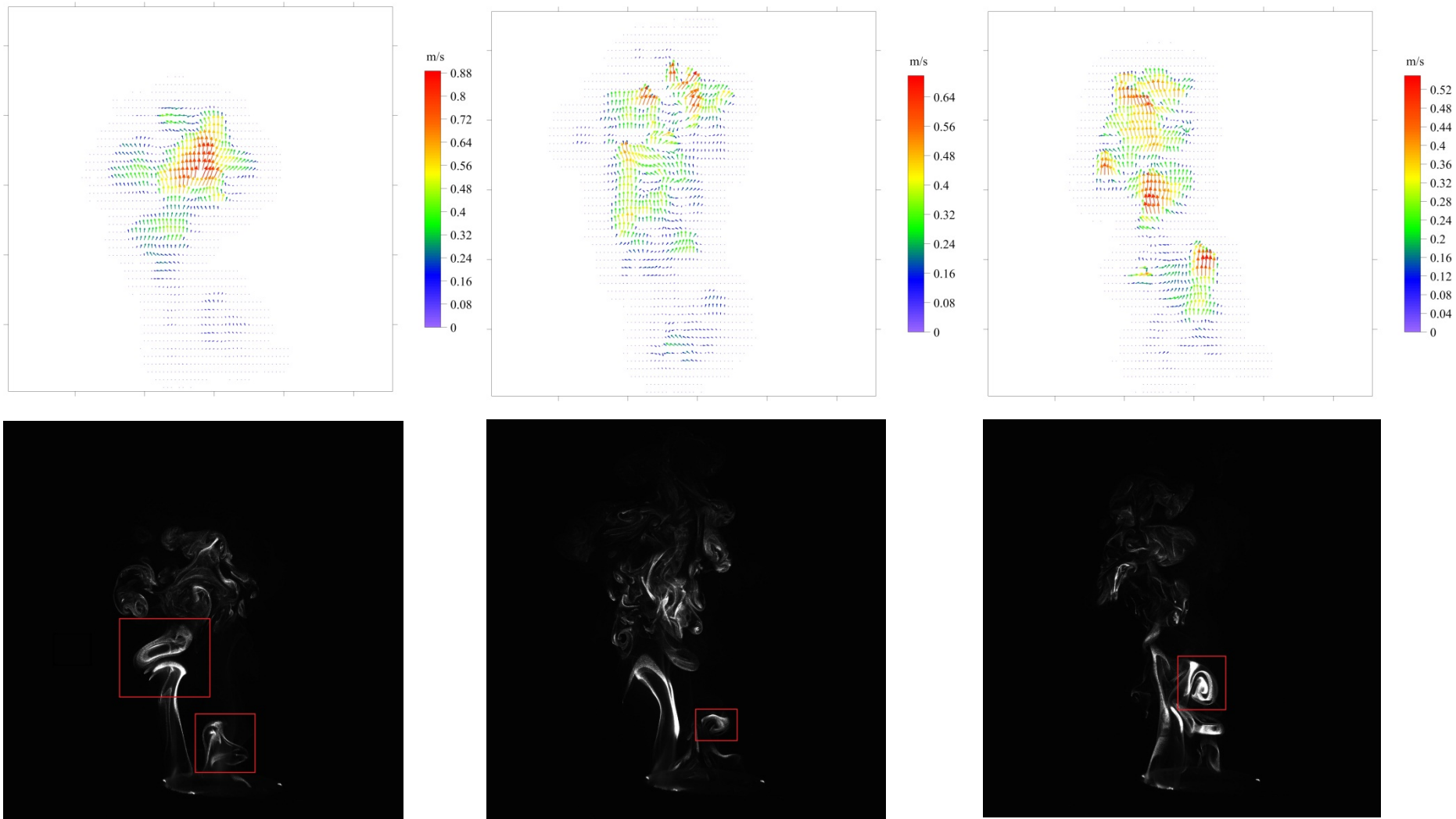


Рис. 16. Мгновенные поля скорости и PIV-изображения пламени при горении спирта.

Расчет масштаба турбулентных вихрей, полученный на основе гипотезы подобия пульсаций полей скорости и температуры

$$b = \frac{\sqrt{k}}{f} = f^{-1} \frac{\sqrt{\langle T'T' \rangle}}{T} \sqrt{gL}$$

Сравнение результатов экспериментальных измерений с теоретическими оценками масштабов турбулентности

Топливо	L (m)	$f \pm \Delta f$ (Hz)	$b \pm \Delta b$ (m)	$b_{\text{exp}} \pm \Delta b_{\text{exp}}$ (m)	Ri_t	Fr_t
Этанол	0.3	4.6±0.5	0.0032±0.0002	0.0033±0.0015	0,05596	17,8712
Бензин	0.7	4.8±0.8	0.025±0.005	0.024±0.004	0,2014	4,9659
		8.6±0.5	0.014±0.001	0.015±0.003	0,1124	8,8973
Керосин	0.7	2.5±0.1	0.157±0.006	0.019±0.005	0,2907	3,4402
		4.0±0.5	0.098±0.014	0.012±0.004	0,2180	4,5869
Дизельное топливо	0.5	4.0±1	0.025±0.0055	0.019±0.006	0,1846	5,4183

Для описания поля течения используются двумерные осесимметричные уравнения Рейнольдса, записанные относительно осредненных по времени составляющих скорости: u , v и давления p :

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v r}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho u v r}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_{\text{eff}} \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial v r}{\partial r} \right) \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu_{\text{eff}} r \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] - (\rho - \rho_e) g$$

$$\frac{\partial \rho u v}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v^2 r}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu_{\text{eff}} r \left(2 \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial v r}{\partial r} \right) \right) \right] - \frac{\mu_{\text{eff}} v}{r^2}$$

Характеристики турбулентности рассчитывались на основе двухпараметрической модели с использованием уравнений для кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε с учетом действия сил плавучести и малости чисел Рейнольдса:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v k r}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} r \frac{\partial k}{\partial r} \right] + G_k + G_p - I - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v \varepsilon r}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} r \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right] + (f_1 G_k - f_2 \rho \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} + J$$

$$G_k = \mu_t \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\}, \quad G_p = -\frac{\mu_t}{\rho \sigma_k} \frac{\partial \rho}{\partial z} g$$

$$f_1 = C_{1\varepsilon} (1 + C_{3\varepsilon} \text{Ri}_{\text{st}})$$

$$f_2 = C_{2\varepsilon} (1 - C_{4\varepsilon} \exp(-\text{Re}_t^2))$$

$$I = \frac{1}{2} \frac{\mu_t}{k} \left[\left(\frac{\partial k}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial r} \right)^2 \right] \quad J = 2 \frac{\mu \mu_t}{\rho} \left[\left[\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right) \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) \right) \right]^2 \right]$$

$$\mu_t = C_\mu f_\mu \rho k^2 \varepsilon^{-1} \quad f_\mu = \exp \left[-\frac{3.4}{(1 + 0.02 \text{Re}_t)^2} \right] \quad \text{Ri}_{\text{st}} = \frac{G_p}{G_k} \quad \text{Re}_t = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon}$$

Для описания конвекции, процессов тепломассообмена и горения помимо уравнения энергии использовались уравнения баланса массы компонентов с учетом протекания в потоке экзотермической реакции:

$$C_p \left(\frac{\partial \rho u T}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v r T}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda_{eff} r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + Q \Phi$$

$$\frac{\partial \rho u M_{fl}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v r M_{fl}}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho D_{eff} \frac{\partial M_{fl}}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\rho D_{eff} r \frac{\partial M_{fl}}{\partial r} \right] - 0.5 \frac{W_{fl}}{W_{ox}} \Phi$$

$$\frac{\partial \rho u M_{ox}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v r M_{ox}}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho D_{eff} \frac{\partial M_{ox}}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\rho D_{eff} r \frac{\partial M_{ox}}{\partial r} \right] - \Phi$$

$$\frac{\partial \rho u M_{pr}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v r M_{pr}}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho D_{eff} \frac{\partial M_{pr}}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\rho D_{eff} r \frac{\partial M_{pr}}{\partial r} \right] + 0.5 \frac{W_{pr}}{W_{ox}} \Phi$$

$$\frac{\partial \rho u M_{in}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v r M_{in}}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho D_{eff} \frac{\partial M_{in}}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\rho D_{eff} r \frac{\partial M_{in}}{\partial r} \right]$$

$$\Phi_{Ar} = z_0 \rho M_{fl}^\alpha M_{ox}^\beta \exp\left(-\frac{E_A}{R_G T}\right)$$

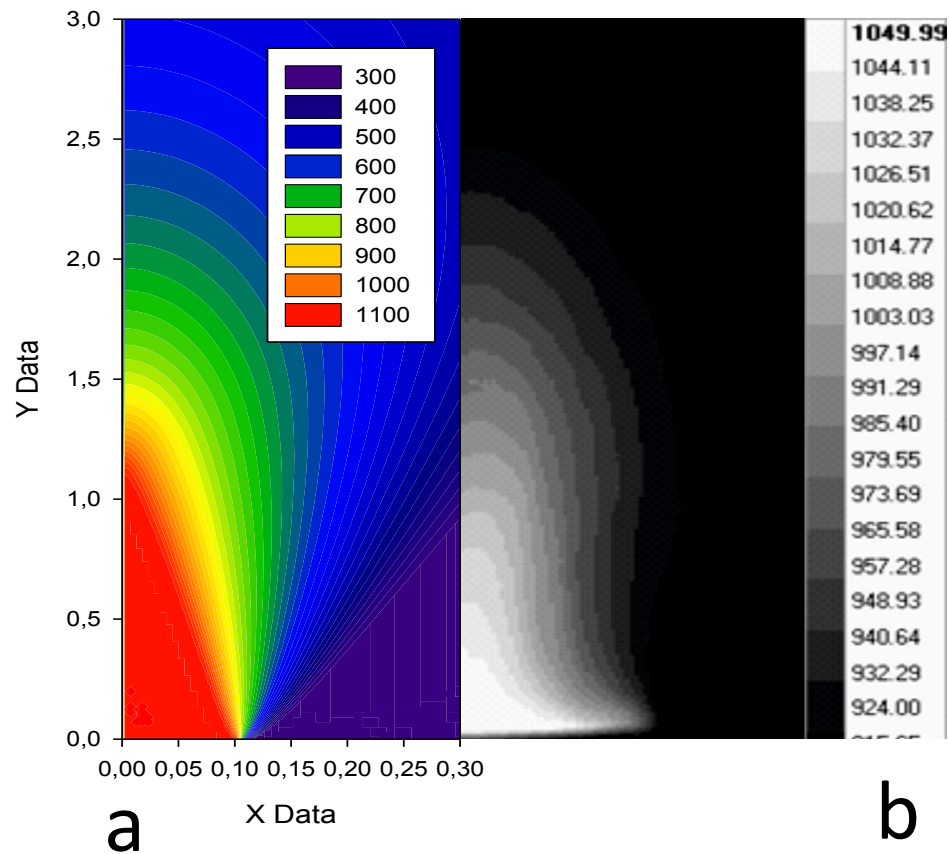


Рис. 17. Распределение средних температур в пламени и в его окрестности. а – результаты математического моделирования (изотермы в факеле пламени), б – осредненная по времени термограмма

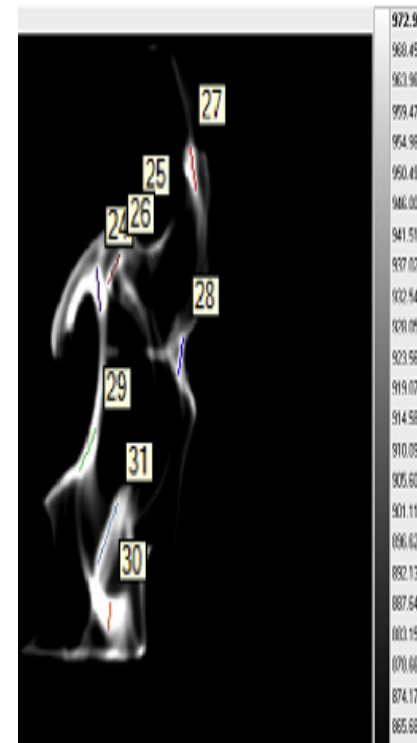
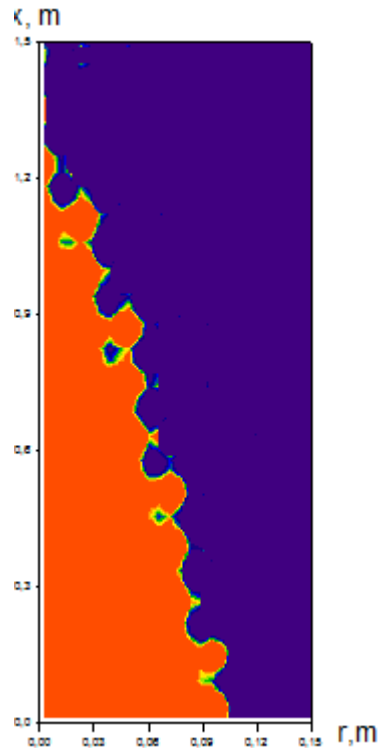
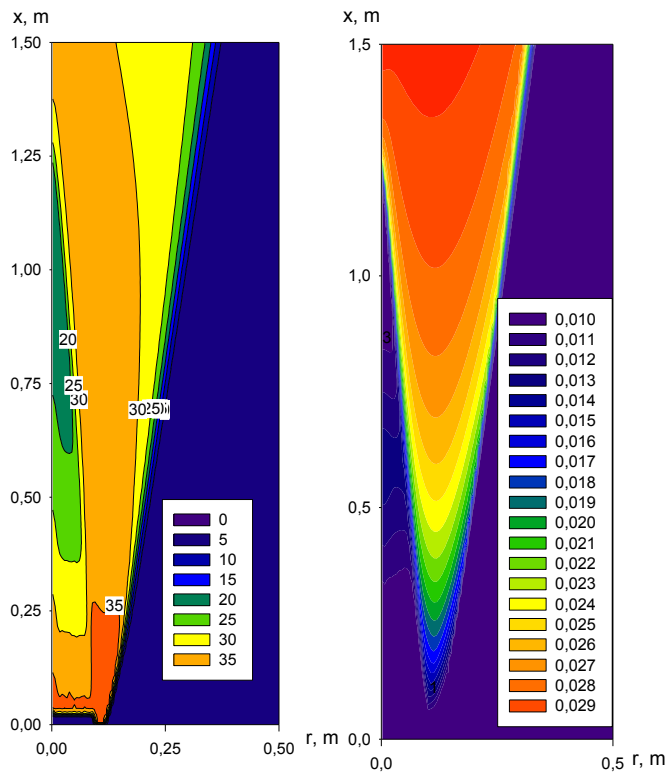


Рис. 18. Среднеквадратичные отклонения пульсаций температуры

Рис. 19. Масштабы турбулентности

Рис. 20. Восстановленное мгновенное поле температуры

Рис. 21. Мгновенная термограмма факела пламени.

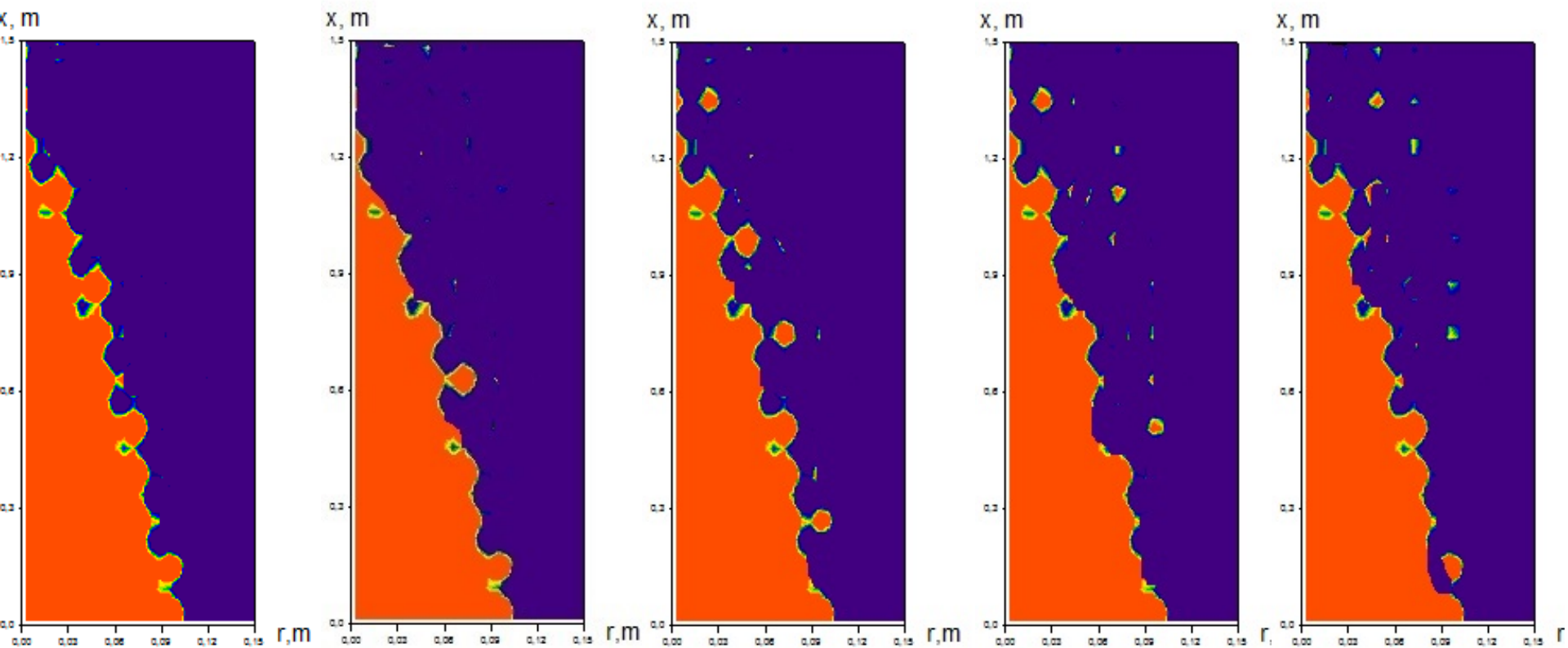


Рис. 22. Восстановленное мгновенное поле температуры, полученное при математическом моделировании

Выводы:

- В спектрах пульсаций температуры при горении жидких углеводородов присутствуют особые максимумы амплитуды в диапазоне 4 ± 1 Гц. Процесс горения носит циклический характер, который возможно зафиксировать только с применением скоростных тепловизоров, работающих в узких спектральных интервалах среднего ИК-диапазона.
- Сравнение масштабов турбулентности, полученных экспериментально, с результатами численного моделирования дает хорошее количественное согласование, что дает возможность используя представленную методику производить оценку масштабов турбулентности в реальных пламенах.
- Пульсации температуры связаны с турбулентностью течения в пламени и характерные частоты в спектре изменения температуры обусловлены масштабами турбулентных вихрей.

Спасибо за внимание!

$$Ri_t Fr_t = 1$$

$$Ri_t = \frac{gH\sqrt{\langle T'T' \rangle}}{TU^2}, \quad Fr_t = \frac{U^2}{gb}, \quad H = \sqrt{\frac{gL}{f^2}}$$