

А.М. Гришин,<sup>2</sup> А.Н. Голованов,<sup>2</sup> В.В. Рейно,<sup>1</sup> В.М. Сазанович,<sup>1</sup>  
А.А. Строкатов,<sup>2</sup> Р.Ш. Цвык,<sup>1</sup> М.В. Шерстобитов<sup>1</sup>

## Экспериментальные исследования огненных смерчей

<sup>1</sup> *Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

<sup>2</sup> *Томский государственный университет*

Поступила в редакцию 18.08.2006 г.

Представлены результаты исследований огненного смерча в модельных условиях. Смерч формировался путем закрутки электродвигателем емкости с горящим материалом (спирт). Определены условия формирования устойчивого смерча при различных оборотах вращения емкости с горючим при свободном горении и при ограничении области горения по высоте.

### Введение

В последние годы все большее внимание привлекают когерентные структуры, к которым, в частности, относятся различного вида смерчи и закрученные потоки [1–8]. В этих работах рассмотрены результаты теоретических и экспериментальных исследований физических характеристик вихрей и смерчей, условия их формирования и устойчивости. Среда в таких потоках является сложной, случайно-неоднородной, в которой непрерывно флуктуируют пространственно-временные поля температуры, скорости движения, показателя преломления.

Условно, с точки зрения величины флуктуаций показателя преломления, когерентные структуры можно разделить на две группы. К первой группе можно отнести структуры с температурой, мало отличающейся от температуры окружающей среды. Ко второй группе — структуры с температурой, значительно превышающей температуру окружающей среды, в основном — это пламена при сжигании топлива в различных режимах и огненные смерчи.

Огненные смерчи — это разновидность атмосферных смерчей, которые являются одной из экологических природных катастроф, приносящих огромные разрушения. Как показывают наблюдения, природные огненные смерчи возникают при крупных лесных пожарах и массовых пожарах в районах застройки, на лесоперерабатывающих предприятиях. Огненный смерч сопровождается заметным радиальным притоком воздуха со всех направлений к основанию центрального конвективного столба и сопутствующим закручиванием потока.

Мощные природные смерчи (торнадо) возникают из вращающегося материнского облака и опускаются в виде хобота до земли. Скорость вращения на периферии может достигать скорости звука. Отличие смерчевого облака от других в том, что оно обязательно вращается. Большая центробежная

сила, возникающая в результате действия закона сохранения момента количества движения, уравновешивается внешним давлением и разрежением внутри смерча. Поток воздуха в хоботе смерча образован тонкими вихревыми нитями. Множество вихревых нитей взаимодействуют друг с другом и вращаются как упругое (резиновый жгут) твердое тело.

В работе [1] описаны экспериментальные исследования условий возникновения различных типов вихревых течений, в том числе и торнадоподобных вихрей, возникающих над вращающимся нагретым диском в атмосфере неподвижного воздуха. Визуализация течения проводилась путем испарения канифоли на поверхности диска. В работе показано, что торнадоподобный вихрь возникает при скорости вращения диска  $\approx (2,3 \pm 1,5)$  об.  $\cdot$  с<sup>-1</sup>. При меньшей или большей скорости вращения наблюдается обычное вращающееся турбулентное течение. Этот тип смерчей, в отличие от огненных, можно условно назвать «тепловым».

Огненный смерч представляет собой более сложное физическое явление. Считается, что при массовых пожарах и пожарах большой интенсивности конвективная колонка, достигающая высоты нескольких километров, образует грозовое облако. Это искусственное облако в ряде случаев может вращаться и, в свою очередь, сформировать огненный смерч. Огненный смерч отличается от обычных атмосферных смерчей рядом дополнительных факторов:

1) наличием источника выделения энергии (2000–13000 ккал/кг в зависимости от вида горючего материала) в достаточно большом объеме за счет сгорания горючих газов, которые выделяются в результате пиролиза (плотных) или испарения (жидких) горючих материалов. Над горящим материалом в результате действия силы Архимеда возникает конвективная колонка нагретых газов;

2) Мощным притоком окислителя (4–17 м<sup>3</sup>/кг воздуха) в зону горения, необходимого для сжигания

горючего материала. В зоне горения происходят интенсивные химические реакции окисления.

Условия, необходимые для возникновения и поддержания смерча в стационарном состоянии, определяются равновесием сил, действующих на среду во вращающейся конвективной колонке: центробежной силы; силы давления внешней среды; подъемной силы Архимеда; силы, возникающей за счет распределения давления (пониженное на оси смерча) внутри смерча; внешней силы, появляющейся за счет влияния скорости ветра.

В работе [7] на основе обобщенной системы уравнений нестационарного двумерного турбулентного движения вязкого сжимаемого газа с учетом процесса горения разработана математическая модель для прогнозирования динамики огненных образований при пожарах на открытом пространстве. Определены характерные особенности огненных вихрей (смерчей), и показано, что смерчи имеют форму вертикального цилиндрического столба высотой в 2–3 раза больше, чем при диффузионном горении, температура по высоте практически не изменяется, давление на оси меньше, чем в окружающей среде.

В работах [10, 11] рассмотрены результаты исследования флуктуаций параметров лазерного пучка, распространяющегося через конвективную колонку и закрученную струю пламени, являющуюся моделью огненного смерча. Для интерпретации результатов этих исследований необходимо знать структуру и физические характеристики среды. Результаты исследований характеристик огненного смерча, моделируемого в лабораторных условиях, рассмотрены в данной статье.

## Аппаратура и методика измерений

На рис. 1 приведена схема стенда. Огненный смерч моделировался вращением цилиндрической емкости диаметром 100 мм и высотой борта 20 мм, наполненной горящим материалом (20, 30 мл спирта). Емкость размещалась на диске диаметром 400 мм, который вращался электродвигателем постоянного тока.

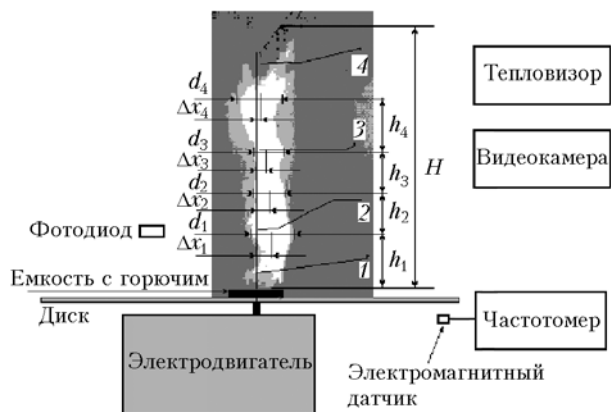


Рис. 1. Схема измерительного стенда. Измеряемые характеристики смерча

Обороты двигателя регулировались изменением напряжения питания, а скорость вращения измерялась частотомером по импульсам электромагнитного датчика. Для исключения влияния колебаний воздуха на структуру смерча устройство помещалось в объем (с основанием  $0,6 \times 0,6$  м и высотой 1,7 м) с закрытыми боковыми стенками. Причем передняя стенка объема закрывалась лавсановой пленкой (прозрачной в видимой и инфракрасной областях), через которую процесс горения регистрировался тепловизором и видеокамерой.

Измерения проводились в двух режимах: при объеме открытом сверху и при установке препятствия (стального листа) на высотах  $z = 0,4$  или  $0,5$  м над емкостью. Во втором варианте моделируется препятствие, которое стабилизирует закрученную струю. Для регистрации процесса горения в видимом диапазоне длин волн использовалась телевизионная видеокамера Sony, а в области 3–5 мкм автоматизированная тепловизионная система АГА-780. Для регистрации флуктуаций светового потока, излучаемого горящим материалом в видимом диапазоне, использовался фотодиод, установленный на высоте 100 мм.

Измерения температуры проводились с помощью стационарно установленных термопар (1–4 на рис. 1), переносной термопары и с использованием тепловизионной методики, описанной в [9]. Термопары были установлены на высотах 30, 50, 100, 200 мм над поверхностью емкости с горящей жидкостью. Диаметр термопар  $\sim 0,25$  мм. Температура окружающей среды была стабильной и равнялась  $17\text{--}19$  °С. Информация с термопар, телевизионной камеры и фотодиода вводилась в компьютер и затем обрабатывалась.

## Результаты измерений

### Измерения в видимом диапазоне

По изображениям, полученным с помощью видеокамеры, с использованием программы обработки Photoshop визуально на уровне видимой яркости определялись следующие параметры смерча (см. рис. 1): высота  $H$ , а в спиральных витках, характерных для структуры смерча, — высота витков  $h_i$ , диаметр  $d_i$  и смещение оси смерча от оси вращения  $\Delta x_i$  ( $i$  — номер сечения).

Примеры изображений, иллюстрирующих форму смерча в различные моменты времени, приведены на рис. 2. Отметим, что форма смерча быстро меняется во времени (на рис. 2, б, в изображения получены с интервалом 0,04 с при малых выдержках), хорошо видны спиралевидные жгуты, формирующие смерч. Первая спираль  $h_1$  смерча имеет максимальную высоту.

В верхней части смерча наблюдаются выбросы из тела смерча (рис. 2, з). В отдельные моменты времени наблюдается распад пламени по высоте на 2–3 части. В среднем верхняя часть пламени по форме близка к конусу. Цвет пламени вблизи

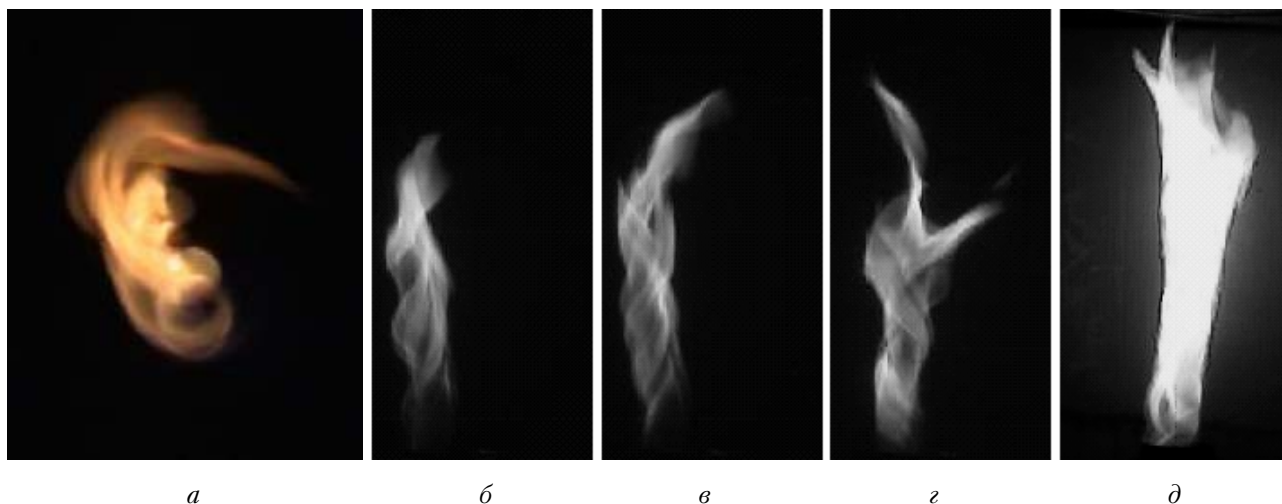


Рис. 2. Вид смерча при открытом объеме: *a* – сверху; *б–г* – с боковой стороны; *д* – вид смерча с боковой стороны при объеме, закрытом на высоте 0,5 м

поверхности горения имеет голубоватый оттенок, в отличие от остальной части смерча, в которой цвет смещен в длинноволновую область.

Введение препятствия над смерчем приводит к его стабилизации. Смерч становится устойчивым за все время горения, прецессия отсутствует, растет диаметр смерча.

Измеряемые характеристики смерча флуктуируют во времени. Это видно из примеров, представленных на рис. 3 при стабильном горении в режиме смерча. Время непрерывного стабильного

горения в таком режиме составляет 8–15 с, затем смерч срывается и вновь восстанавливается.

В табл. 1 представлены средние за время горения параметры смерча для двух режимов моделирования: при пространстве, открытом сверху, и при пространстве, ограниченном сверху (объем закрыт на высоте  $z$  стальным листом). Из таблицы видно, что параметры смерча существенно зависят от режима моделирования.

Результаты анализа характеристик смерча для двух режимов моделирования приведены в табл. 2.

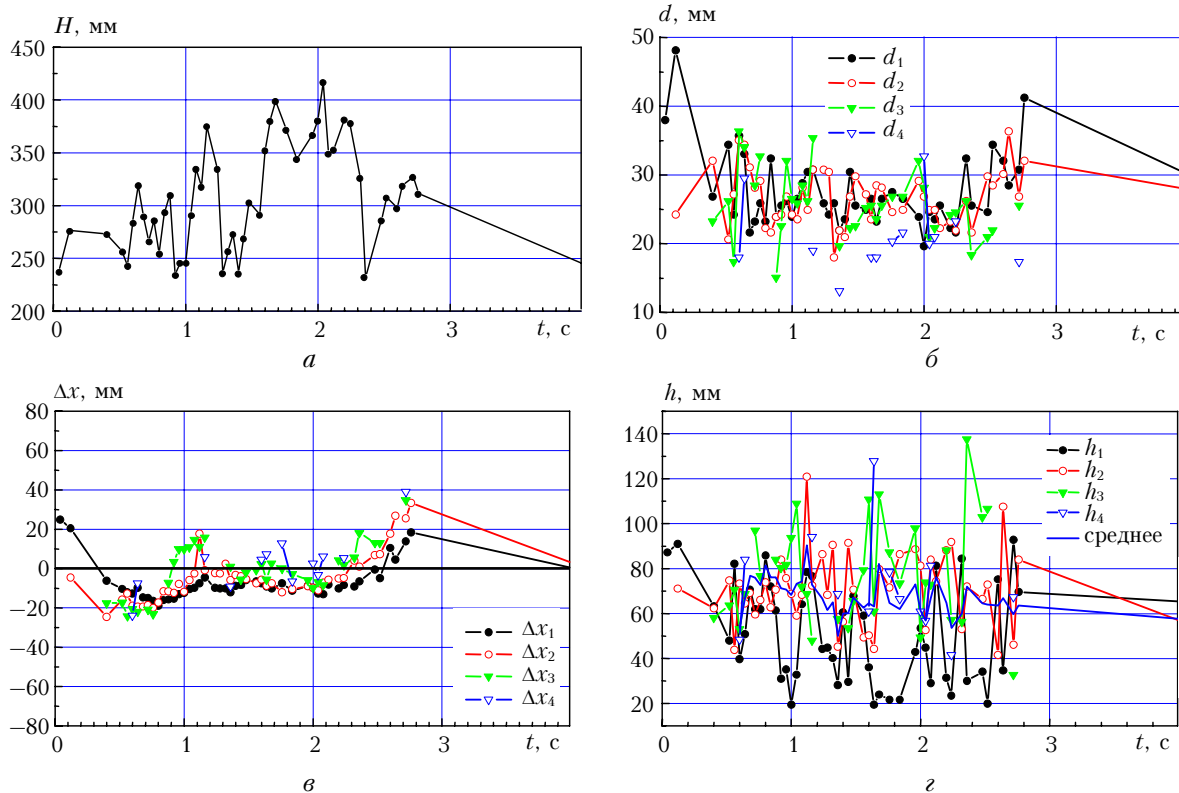


Рис. 3. Изменение параметров смерча во времени: *a* – высота; *б* – диаметр; *в* – отклонение оси; *г* – высота витков спирали

Таблица 1

## Средние геометрические размеры огненного смерча в различных условиях моделирования

Параметр, мм	Без ограничения		Ограничение на высоте $z$ , м			
			0,5		0,4	
	СЗ	СКО	СЗ	СКО	СЗ	СКО
$d_0$	30	10	59	10	60	12
$d_1$	28	7	60	13	55	12
$d_2$	26	5	66	17	53	11
$d_3$	22	5	104	20	109	26
$\Delta x_1$	-9	15	-	-	-	-
$\Delta x_2$	-4,6	17	-	-	-	-
$\Delta x_3$	-5	13	-	-	-	-
$\Delta x_4$	6	15	-	-	-	-
$H$	290	55	430	30	380	20
$h_1$	54	20	98	9	70	9
$h_2$	74	17	96	11	90	10
$h_3$	75	20	155	30	150	20

Примечание. СЗ – средние значения; СКО – среднеквадратическое отклонение.

Таблица 2

## Сравнение характеристик смерча в двух режимах моделирования

При объеме, открытом сверху	При объеме, закрытом сверху
<p>1. Относительно устойчивый смерч формируется при скорости вращения диска <math>\sim(3,8 \pm (0,2 \div 0,4))</math> об./с. Изменение оборотов приводит к срыву смерча и переходу к вращающемуся турбулентному горению. Наблюдается прецессия оси смерча – смещение от оси вращения емкости с горящим топливом и достаточно медленное вращение оси смерча со скоростью 0,1–0,15 об./с по поверхности емкости с отклонением от центра на расстояние, превышающее радиус смерча</p> <p>2. Форма смерча быстро меняется во времени и в среднем напоминает цилиндр диаметром от 30–40 мм, медленно уменьшающимся в конце горения до 20 мм</p> <p>3. Средняя высота смерча <math>\sim 290</math> мм, т.е. значительно меньше, чем при наличии препятствия, и только в отдельных измерениях приближается к 400 мм</p> <p>4. Высота витков быстро меняется во времени и составляет <math>\sim 50 \div 75</math> мм</p> <p>5. Отношение длины окружности по диаметру витка к его высоте определяет отношение тангенциальной <math>V_t</math> скорости к вертикальной <math>V_v</math> (<math>2\pi d_i/h_i = V_t/V_v</math>) и составляет для первого <math>\sim 1,6</math> и для второго и третьего витков <math>\sim 1</math></p>	<p>1. Устойчивый смерч также формируется при скорости вращения диска <math>\sim 3,8</math> об./с и сохраняется при увеличении скорости вращения до максимально измеренных <math>\sim 8</math> об./с. Увеличение числа оборотов диска приводит к некоторому увеличению диаметра смерча. Практически не наблюдается прецессии оси смерча</p> <p>2. Форма смерча устойчива до полного выгорания топлива и близка к цилиндру диаметром <math>\sim 60</math> мм, который вблизи препятствия имеет расширяющуюся воронку или отдельные языки, которые распространяются вдоль поверхности препятствия</p> <p>3. Высота смерча <math>\sim 430</math> мм при <math>z = 0,5</math> м и <math>\sim 380</math> мм при <math>z = 0,4</math> м близка к высоте расположения препятствия</p> <p>4. Высота витков стабильна и равна <math>\sim 60 \div 150</math> мм</p> <p>5. Отношение <math>2\pi d_i/h_i = V_t/V_v</math> для всех витков составляет <math>\sim 2</math></p>

### Измерения параметров смерча в инфракрасной области

На рис. 4 приведен пример изображения смерча, полученного с помощью тепловизионной системы (формат изображения  $100 \times 100$  пикселей).

При обработке кадров определялись: максимальная температура и ее координаты, высота, диаметр смерча. В усредненном за время реализации изображении измерялись: распределение температуры по высоте и в поперечном сечении. Результаты обработки приведены на рис. 5, 6.

Анализ результатов тепловизионных измерений показал следующее:

1. Максимальная температура в смерче составляет 800–950 К и близка к результатам измерений с помощью термопар. Совпадение температур, измеренных датчиком температуры и оптическим методом, позволяет сделать вывод о том, что коэффициент излучения пламени в диапазоне 3–5 мкм близок к значениям 0,9–1.

2. Яркостная температура практически не изменяется до  $\sim 2/3$  высоты смерча и затем быстро уменьшается. Вблизи поверхности горючего мате-

риала температура ниже максимальной. Этот результат находится в согласии с данными работы [7].

3. Среднее распределение яркостной температуры в поперечном сечении близко к гауссовскому.

4. Средний диаметр смерча  $\sim 100$  мм, высота  $\sim 400$  мм и несколько больше, чем в видимом диапазоне. Это связано с тем, что в видимом диапазоне излучает только высокотемпературная часть пламени. Диапазон температур, измеряемых тепловизором, в инфракрасном диапазоне более широкий.

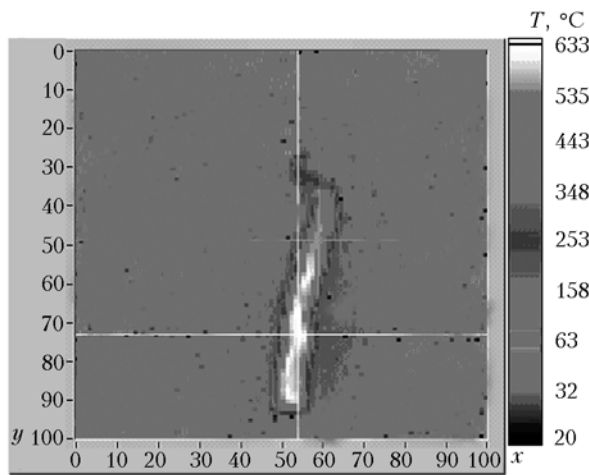


Рис. 4. Пример тепловизионного изображения смерча

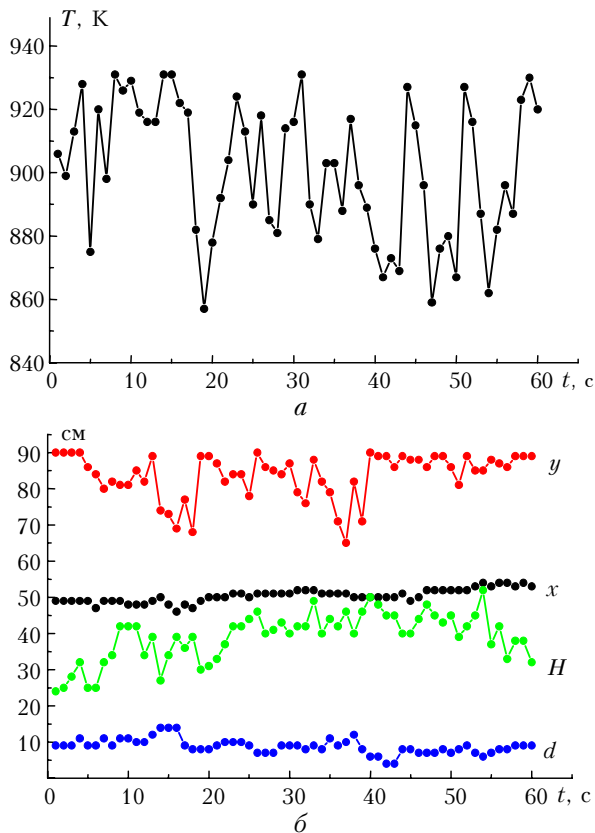


Рис. 5. Изменение во времени параметров смерча: *a* – максимальной температуры; *б* – диаметра *d*, высоты *H*, координаты максимальной температуры по вертикали *y*, горизонтали *x*

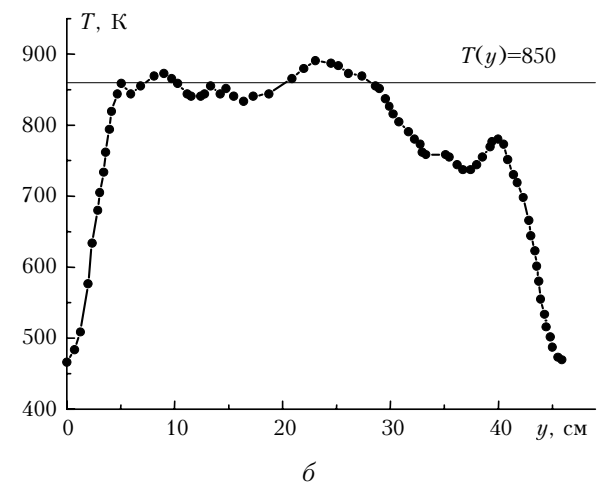
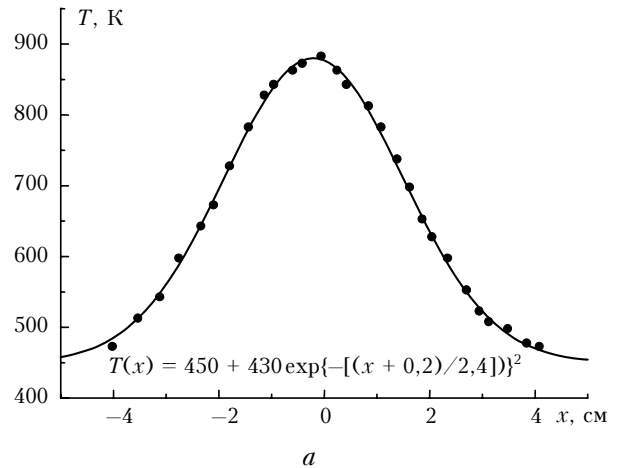


Рис. 6. Тепловизионные измерения средней температуры: *a* – в поперечном сечении пучка (ось *x*); *б* – по вертикали (ось *y*)

## Выводы

1. При объеме, открытом сверху:

- устойчивый смерч формируется при ограниченной скорости вращения ( $\sim 3,8$  об./с), определяемой равновесием сил, действующих на пламя. Структура смерча имеет сложную спиралевидную структуру (витки), быстро изменяющуюся во времени, движение газа имеет тангенциальную и вертикальную составляющие скорости;

- время непрерывного устойчивого горения в режиме смерча составляет 8–15 с. Отметим, что присутствует прецессия (смещение оси по объему и медленное вращение  $\sim 0,1$ – $0,15$  об./с) смерча с отклонением оси от центра на расстояние, превышающее радиус смерча;

- высота смерча меняется во времени от 250 до 450 мм, диаметр – 20–40 мм, отклонение оси –  $\pm 30$  мм, высота витков – 30–140 мм;

- максимальные температуры, измеренные термомпарами и тепловизором, равны  $\sim 800$ – $1000$  К. Яркостная температура практически не изменяется до  $\sim 2/3$  высоты смерча и затем быстро уменьшается.

2. При объеме, ограниченном сверху:

– смерч устанавливается при скорости вращения 3,8 об./с и сохраняет устойчивость в течение всего времени горения горючего материала при увеличении скорости вращения до 8 об./с, измеренных в данном эксперименте; прецессия незначительна;

– с увеличением скорости вращения диаметр смерча увеличивается. Он приобретает грушевидную форму с небольшим сжатием на высоте  $\sim 2/3h$  и значительным расширением вблизи поверхности, ограничивающей объем сверху. Высота смерча близка к высоте свободного пространства между емкостью с горючим и этой поверхностью.

1. Бубнов Б.М. Термическая структура и турбулизация торнадоподобных вихрей от локализованных источников тепла над вращающимся диском // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 1997. Т. 33. № 4. С. 434–442.
2. Гришин А.М., Голованов А.Н., Суков Я.В. Физическое моделирование огненных смерчей // Докл. РАН. 2004. Т. 35. № 2. С. 196–198.
3. Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. 522 с.
4. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новоси-

бирск: Изд-во Ин-та теплофизики СО РАН, 2003. 504 с.

5. Интенсивные атмосферные вихри / Под ред. Л. Бенгтессона, Дж. Лайтхилла. М.: Мир, 1985. 368 с.
6. Кэрьюер Г.Ф., Фенделл Ф.Е., Фелдман П.С. Огненные смерчи // Теплопередача. 1985. Т. 107. № 1. С. 6–25.
7. Гостинцев Ю.А., Рыжов А.М. Численное моделирование динамики пламени, огненных вихрей и штормов при пожарах на открытом пространстве // Изв. РАН. Мех. жидкости и газа. 1994. № 6. С. 52–61.
8. Гришин А.М., Голованов А.Н., Строкатов А.А., Цвык Р.Ш. Экспериментальные исследования огненных смерчей // Докл. РАН. 2005. Т. 400. № 5. С. 618–620.
9. Гришин А.М., Долгов А.А., Рейно В.В., Цвык Р.Ш., Шерстобитов М.В. Тепловизионные исследования низовых лесных пожаров // Матер. Междунар. конф. «Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия». Иркутск, 2001. С. 63–66.
10. Сазанович В.М., Цвык Р.Ш. Экспериментальные исследования конвективной колонки над горящим лесным материалом // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 4. С. 375–382.
11. Гришин А.М., Сазанович В.М., Строкатов А.А., Цвык Р.Ш. Исследования распространения лазерного излучения через высокотемпературную закрученную струю // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19. № 12. С. 1042–1046.

*A.M. Grishin, A.N. Golovanov, V.V. Reino, V.M. Sazanovich, A.A. Strokotov, R.Sh. Tsvyk, M.V. Sherstobitov. Experimental study of fire tornado.*

Results of fire tornado investigations under model conditions are presented. The tornado is formed via swirling a tank filled with a burning substance (spirit) by an electric motor. The conditions for the stable tornado formation at different revolutions of the tank both at a free spirit burning and at altitudinal limitation of the flame have been determined.