

УДК 551.515.3

М.В. ШЕРСТОБИТОВ, Е.Л. ЛОБОДА**, В.М. САЗАНОВИЧ*, Р.Ш. ЦВЫК****ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ОГНЕННОГО СМЕРЧА НА ПАРАМЕТРЫ ЗОНДИРУЮЩЕГО ПУЧКА И СОБСТВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ¹**

Модельный огненный смерч (МОС) формировался путем закрутки внешнего воздушного потока вокруг неподвижной емкости с горящим топливом. При различных скоростях закрутки и разных высотах измерялись флуктуации лазерного пучка, распространяющегося через смерч, флуктуации собственного излучения пламени. Производилась тепловизионная съемка МОС. Показано, что измеренные частотные характеристики не соответствуют аналогичным характеристикам для развитой оптической турбулентности, подчиняющейся степенному закону Колмогорова – Обухова. С применением корреляционного анализа термограмм были получены характерные частоты МОС. Основная частота хорошо соответствует частоте закрутки воздушного потока.

Ключевые слова: флуктуации, лазерное просвечивание, огненный смерч, тепловизор.

В последние годы все большее внимание привлекают когерентные структуры, к которым, в частности, относятся различного вида смерчи и закрученные потоки [1–3]. В этих работах рассмотрены результаты теоретических и экспериментальных исследований физических характеристик вихрей и смерчей, условия их формирования и устойчивости. Среда в таких потоках представляет собой сложную, случайно неоднородную среду, в которой непрерывно флуктуируют пространственно временные поля распределения температуры, скорости движения, показателя преломления. Условно, с точки зрения величины флуктуаций показателя преломления, эти структуры можно разделить на 2 группы. К первой группе можно отнести структуры с температурой, мало отличающейся от температуры окружающей среды. К ним относятся сверхзвуковые течения в аэродинамических трубах, поток воздуха за летящим снарядом и т.д. Ко второй группе относятся структуры с температурой, значительно превышающей температуру окружающей среды, это, в основном, огненные смерчи, возникающие при массовых и мощных пожарах, струя реактивного двигателя.

Лабораторными исследованиями смерчей-вихрей занимаются давно как в нашей стране, так и за рубежом. Однако самые интенсивные и локализованные атмосферные вихри торнадо являются одновременно самыми неизученными. Парадокс существования смерча заключается в том, что он представляет собой устойчивую с точки зрения гидродинамики структуру. В объеме струи идет химическая реакция горения с выделением большого количества энергии, дополнительным расходом воздуха. Условия формирования и устойчивого горения топлива в режиме огненного смерча определяются закручивающей силой, а также равновесием сил, действующих на среду. В большинстве случаев движение в этих структурах носит сложный турбулентный характер, исследования которого находятся на начальной стадии.

Цель данной работы – определение турбулентных характеристик огненного смерча, а также определение скорости вращения МОС. Для исследования флуктуаций показателя преломления среды были применены оптические методы, основанные на просвечивании турбулентного потока лазерным излучением, и широко используемые в атмосферных исследованиях [3, 4]. В частности, на данном этапе измерялись флуктуации интенсивности лазерного пучка, прошедшего через пламя, а так же флуктуации собственного светового потока пламени. Производилась скоростная (до 170 Гц) тепловизионная съемка МОС

Топливом для МОС служил этанол, а окружающий воздушный поток создавался вращающейся крыльчаткой [3]. Скорость вращения крыльчатки менялась от 7 до 14 Гц.

Формировалось два коллимированных зондирующих лазерных пучка (ЗП), радиусом 1 см, длиной волны $\lambda = 0,63$ мкм, которые пересекали МОС на разных высотах: первый постоянно на высоте 10 см, высота второго менялась от 10 до 48 см над уровнем горящего этанола. Излучение лазеров принималось фотоприемниками (ФЭУ), перед которыми установлены диафрагмы диаметром 0,1 мм. Такой размер диафрагм и используемые интерференционные фильтры отфильтровывали излучение лазеров от собственного излучения МОС. Второй ФЭУ настраивался на второй ЗП. Третий ФЭУ с диафрагмой 0,5 мм принимал собственное излучение МОС на одном уровне со вторым. Сигналы с ФЭУ оцифровывались с частотой 12–15 кГц, записывались и обрабатывались

¹ Работа выполнена в рамках НОЦ, ГК № 02.740.11.0674.

на компьютере. Рассчитывались дисперсии σ^2 и спектральные функции $fW(f)$, где $W(f)$ – спектральная плотность, f – частота. Тепловизионная съемка производилась отдельно для шести различных частот закручивающего потока.

На рис. 1 представлен пример расчета спектральной функции $fW(f)$, а на рис. 2 – результаты анализа зависимости частоты максимума f_m флуктуаций интенсивности ЗП от скорости закрутки.

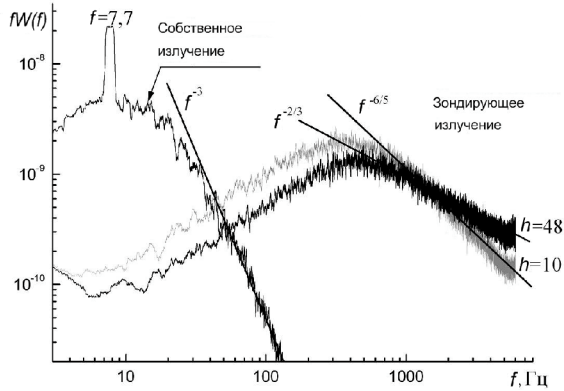


Рис. 1. Пример спектров флуктуаций интенсивности ЗП и собственного излучения пламени, частота закрутки – 7,7 об/с на высоте $h = 48$ см над емкостью с горючим

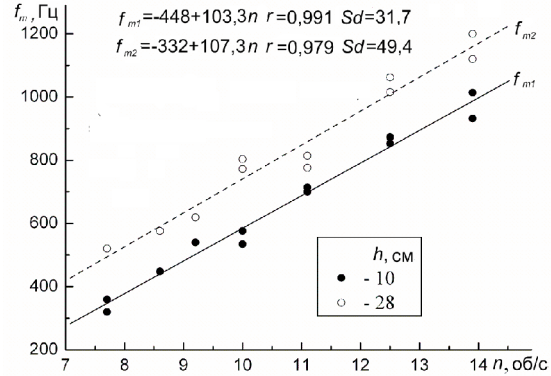


Рис. 2. Зависимость частоты максимума f_m спектральной функции флуктуаций интенсивности ЗП от скорости закрутки воздушного потока

Как следует из анализа спектров, в области $f > f_m$ наклон спектров изменяется от $f^{-2/3}$ на высоте 10 см до $f^{-6/5}$ на высоте 48 см и зависит от скорости вращения крыльчатки. Частота максимума спектра флуктуаций интенсивности при увеличении скорости закрутки растёт линейно (рис. 2). Так как на флуктуации интенсивности основное влияние оказывают масштабы неоднородностей порядка дифракционного размера $l \leq (\lambda L)^{1/2}$, можно предположить, что эти масштабы соответствуют внутренней структуре смерча, которая формируется в установившемся режиме, и переносится со скоростью движения. Форма измеренных спектров не соответствует аналогичным спектрам при распространении в развитой атмосферной турбулентности, когда $f \sim f^{-5/3}$ при $f > f_m$.

Частотный диапазон собственного излучения пламени достигает 200 Гц. При этом в спектре присутствует достаточно узкий максимум (пик) на частоте $f_{\text{мод}}$, соответствующей частоте закрутки с высоким уровнем корреляции $r = 0,986$ (рис. 1 и 3). Частота максимума спектра (за исключением пика $f_{\text{мод}}$), мало меняется с высотой и колеблется в пределах от 5 до 12 Гц при изменении оборотов. Скорость спада спектров флуктуаций собственного излучения пламени в высокочастотной области изменяется от $f^{-5/3}$ до f^{-3} .

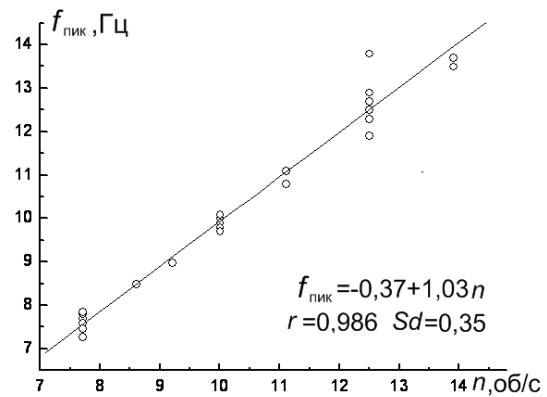


Рис. 3. Сравнение частоты пика спектральной плотности собственного излучения смерча от скорости закрутки

Основой для корреляционного анализа тепловизионных данных служили временные ряды интенсивности точек термограмм с одинаковыми координатами на пяти высотах МОС. На рис. 6 представлен типичный вид функции $fW(f)$ при анализе тепловизионных данных. Частота основного максимума подобно частоте максимума собственного излучения (рис. 1) соответствует частоте закрутки воздушного потока.

Зависимость уровня флуктуаций σ^2 зондирующих пучков от высоты распространения над горящим этанолом для трех скоростей вращения показана на рис. 4. При всех измеренных скоростях вращения дисперсия линейно уменьшается с высотой и на высоте 48 см практически в 2 раза меньше по сравнению с высотой 10 см. Уровень флуктуаций собственного излучения пламени с увеличением высоты. Флуктуации интенсивности σ^2 зондирующих пучков при малых скоростях закрутки почти на порядок отличается от уровня флуктуаций собственного излучения пламени и слабо растут с увеличением скорости вращения (рис. 5). В то же время уровень флуктуаций собст-

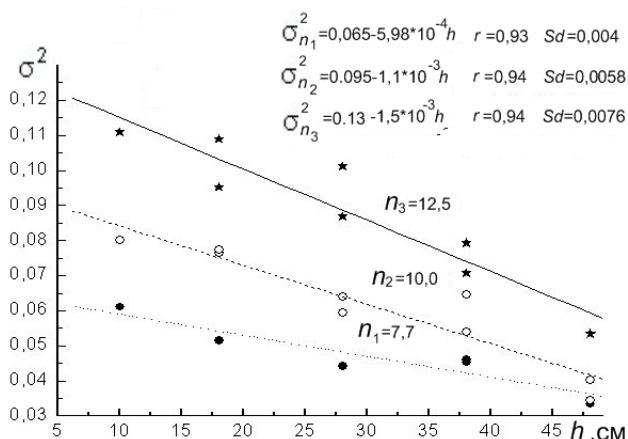


Рис. 4. Зависимость дисперсии флуктуаций интенсивности ЗП от высоты при различной скорости закрутки

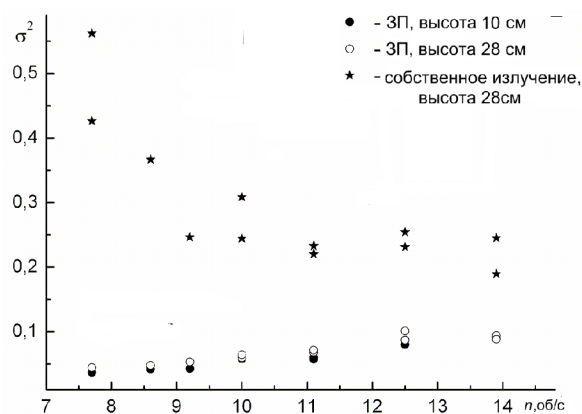


Рис. 5. Уровни флуктуаций в зависимости от скорости закрутки

венного излучения пламени быстро уменьшается с увеличением оборотов закручивающего потока от 7 до 10 об/с и при дальнейшем увеличении оборотов стабилизируются и приближаются к уровню флуктуаций интенсивности зондирующих пучков.

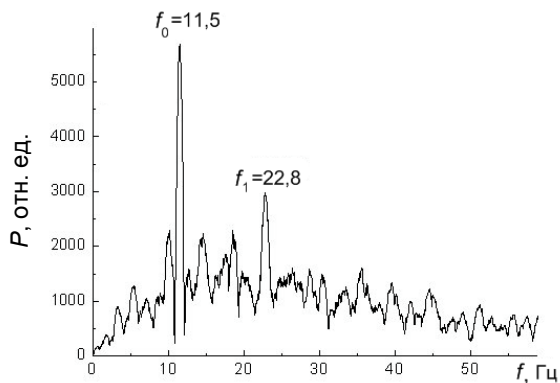


Рис. 6. Пример спектральной плотности мощности временной последовательности в точке на оси МОС по 6000 термограмм при скорости закрутки 12,1 Гц

Проведенные исследования показали:

- оптические характеристики смерча определяются, в основном, скоростью закрутки воздушного потока вокруг горящего материала;
- измеренные частотные характеристики не соответствуют аналогичным характеристикам для развитой оптической турбулентности, подчиняющейся степенному закону Колмогорова – Обухова;
- на гладкой спектральной функции $fW(f)$ при анализе собственного излучения МОС и тепловизионной съемке появляется пик, который соответствует скорости закрутки воздушного потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2003. – 504 с.
2. Бубнов Б.М. // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. – 1997. – Т. 33. – №4. – С. 434-442.
3. Гришин А.М., Голованов А.Н., Рейно В.В. и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20. – № 3. – С. 237-242.
4. Гришин А.М., Рейно В.В., Сазанович В.М., Шерстобитов М.В. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 12. – С. 14-23.

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 20.07.12.

**Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия
E-mail: shmike@iao.ru

Шерстобитов Михаил Валентинович, науч. сотр.;
Лобода Егор Леонидович, к.ф.-м.н., доцент;
Сазанович Валентина Михайловна, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;
Цвык Рувим Шахнович, к.ф.-м.н., ведущ. науч. сотр.