

УДК 536.24

## **Влияние акустических колебаний на устойчивость теплового смерча**

**А.О. Белоусова, А.Н. Голованов, И.В. Матвеев**

*Томский государственный университет*

E-mail: mivvas@mail.ru

В настоящей работе осуществлялось физическое моделирование тепловых смерчей в лабораторных условиях. В диапазоне  $0 \div 300$  Гц были обнаружены избирательные частоты, при которых наблюдалось разрушение смерча. Для анализа полученных данных проводились измерения профилей скорости при помощи ЛДИС ЛАД-05М. По результатам, полученным для пульсаций скорости, рассчитывался коэффициент корреляции между значениями скорости в измеряемых точках и функцией  $\cos(2\pi f\Delta t)$ , описывающей звуковые колебания. В теоретической части работы на основе решения дисперсионного уравнения модели Эйлера была построена граница устойчивости существования смерчей. Получено удовлетворительное согласование экспериментальных результатов с расчетными.

**Ключевые слова:** тепловой смерч, разрушение смерча, акустическое поле.

### **Введение**

Среди вихревых течений особое место занимают концентрированные вихри. Их изучение представляет огромный интерес как для фундаментальных исследований, так и для практики [1]. Классическим примером, представляющим собой концентрированный вихрь, является вихрь Рэнкина. Для вязких течений — вихрь Бюргерса.

Среди природных явлений следует отметить вихри типа торнадо (смерчи) [2, 3]. В настоящее время в мире ежегодно регистрируется более 1000 смерчей. Однако именно они являются самыми неизученными по причине невозможности их исследования в природных условиях [4, 5].

Целью настоящей работы является физическое моделирование теплового смерча типа торнадо в лабораторных условиях, исследование влияния акустических колебаний на формирование и устойчивость теплового смерча.

### **1. Описание экспериментальной установки и методики проведения экспериментов**

Моделирование тепловых смерчей осуществлялось с помощью экспериментальной установки, основанной на закрутке восходящего конвективного потока вращением нижнего основания [6]. На рис. 1 показано устройство такой экспериментальной установки, состоящей из электродвигателя — 1, основания — 2, регулятора напряжения — 3, круглого диска — 4 с закрепленным на нем источником

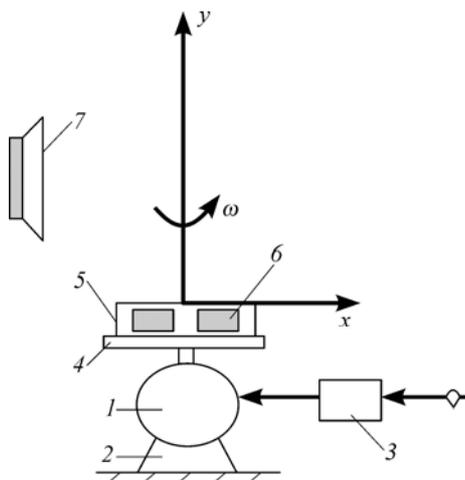


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для моделирования теплового смерча.

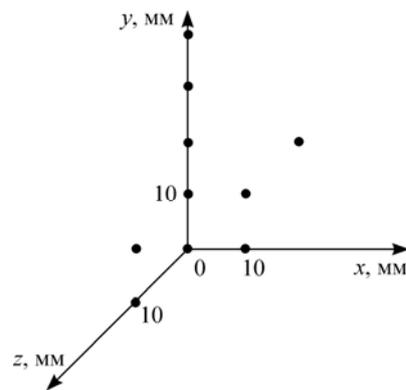


Рис. 2. Контрольные точки сбора информации ЛДИС.

тепла, выполненным в форме цилиндрического диска, — 5. Внутри диска размещались электрические нагревательные элементы — 6. Частота вращения вала электродвигателя с диском и нагревателем задавалась с помощью регулятора напряжения и варьировалась в пределах  $\nu = (0 \div 1,8)$  Гц. Звуковые колебания генерировались в направлении перпендикулярном оси симметрии потока. Их источник находился на расстоянии 210 мм от оси симметрии диска и на высоте 180 мм над ним. Акустические колебания возбуждались с помощью динамического громкоговорителя — 7 и задавались низкочастотным генератором сигналов ГЗ-56/1 [7].

Профили скорости измерялись с помощью лазерной доплеровской измерительной системы (ЛДИС) для диагностики газожидкостных потоков ЛАД-05М. Точки, в которых измерялась скорость, показаны на рис. 2, в каждой из них регистрировалось по 200 значений. Начало координат находилось на оси симметрии диска и на высоте 200 мм над ним.

При проведении экспериментов рассматривался вопрос о возникновении и дальнейшей эволюции вихря. Тепловой смерч появлялся в достаточно узком диапазоне частот вращения основания ( $0,7 \div 1,8$  Гц), причем как при значении, близком к 0,7 Гц, так и при близком к 1,8 Гц, смерч становился неустойчивым. В связи с этим дальнейшие исследования осуществлялись при частоте  $\nu = 1,3$  Гц [8].

## 2. Воздействие акустических колебаний на тепловой смерч и результаты измерений профилей скорости

При проведении экспериментов частота акустического поля  $f$  изменялась в пределах  $0 \div 1500$  Гц, интенсивность задавалась на уровне 60 дБ. При оценке энергии теплового смерча было сделано предположение, что смерч является однородным воздушным цилиндром с радиусом 0,01 м, высотой 0,6 м и средней температурой 355 °К, вращающимся с постоянной угловой скоростью  $\omega = 2\pi\nu$  ( $\nu = 1,3$  Гц). Расчет показал, что лабораторный тепловой смерч обладает энергией  $E \approx 11$  Дж. Следует заметить, что доля кинетической энергии ничтожно мала. Результаты исследования показали, что без воздействия акустических колебаний тепловой смерч представляет собой устойчивую структуру, состоящую из основания и ядра с четкими границами. Варьирование частот в диапазоне выше 300 Гц показало, что вихрь на них не реагирует. В диапазоне  $0 \div 300$  Гц были обнаружены избирательные частоты, при которых наблюдалось разрушение смерча. Интересно,

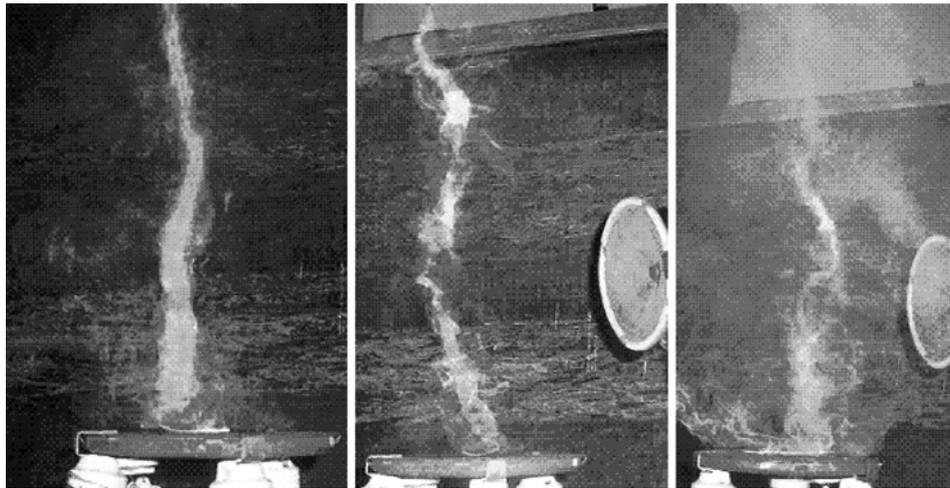


Рис. 3. Тепловой смерч. Без воздействия акустики (а), с частотами  $f=100$  (b), 300 (c) Гц.

что эти частоты кратны 100 Гц (100, 200, 300 Гц). На рис. 3, а–с приведены фотографии теплового смерча при воздействии указанных частот и без акустических колебаний.

По фотографиям видно, что воздействие акустического поля с указанными частотами приводит к разрушению теплового смерча.

На рис. 4–6 представлены некоторые результаты измерений проекций скорости теплового смерча вдоль оси  $Ox$  для точек (0,0,20), (0,0,30), (0,0,40), проведенных с помощью ЛДИС.

По полученным результатам для пульсаций скорости в измеряемых точках рассчитывалась корреляционная функция

$$R_{V,f} = \frac{\sum_{i=1}^N V_{xi} \cos(2\pi f \Delta t_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N V_{xi}^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N \cos^2(2\pi f \Delta t_i)}}, \quad \text{при } \Delta t = 0,00001, N = 200.$$

В таблице приведены значения корреляционной функции в измеряемых точках и для разных частот  $f$  (100, 200, 300 Гц).

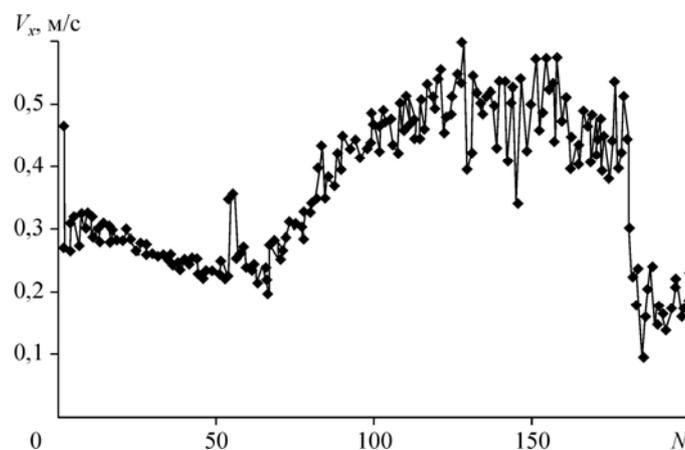


Рис. 4. Проекция вектора скорости на ось  $Ox$  в точке (0,0,20).

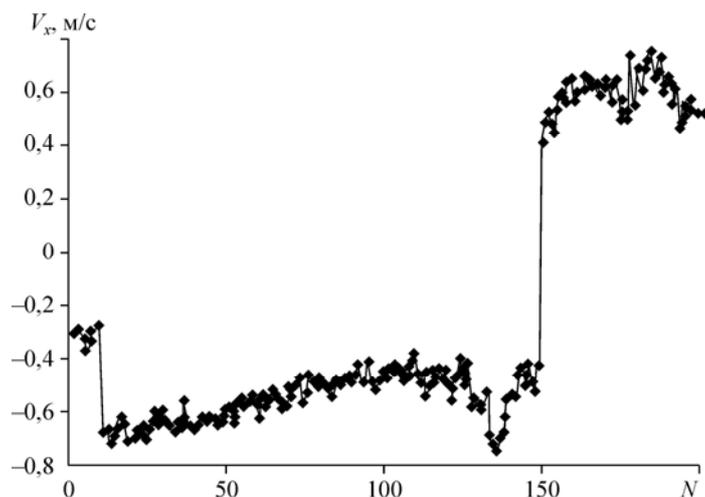


Рис. 5. Проекция вектора скорости на ось  $Ox$  в точке  $(0, 0, 30)$ .

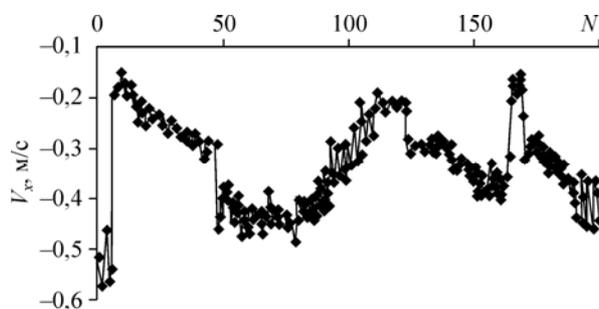


Рис. 6. Проекция вектора скорости на ось  $Ox$  в точке  $(0, 0, 40)$ .

Из таблицы видно, что в точках 6–8 абсолютные значения корреляционной функции составляют  $\sim 0,4$  и выше (знаки ‘+’ и ‘-’ соответствуют интенсификации и подавлению турбулентных пульсаций). Следовательно, взаимодействие акустических колебаний с пульсациями скорости газа в смерче носит резонансный характер. Вероятно, это и приводит к разрушению теплового смерча.

Представляет интерес сравнение полученных результатов с данными, отмеченными на диаграмме устойчивости (рис. 7), полученной авторами работы [9]

Таблица

Значения корреляционной функции

№ контрольной точки	Координаты точек	Значения корреляционной функции $f_c$ , Гц		
		100	200	300
1	(0.0.0)	0,160304524	0,221540468	0,357076764
2	(-10.0.0)	-0,181304871	-0,22274135	-0,296045374
3	(0.-20.0)	-0,079530226	-0,086213027	-0,097566571
4	(0.-10.0)	0,181337492	0,160282785	0,089194746
5	(0.0.10)	-0,008688794	0,026687862	0,094408345
6	(0.0.20)	-0,420805185	-0,409740687	-0,359236982
7	(0.0.30)	-0,740929846	-0,689528205	-0,51244912
8	(0.0.40)	0,398098502	0,42818321	0,469481377
9	(0.10.0)	0,166073315	0,210608599	0,303855538
10	(10.0.0)	0,11531381	0,150305639	0,215174145

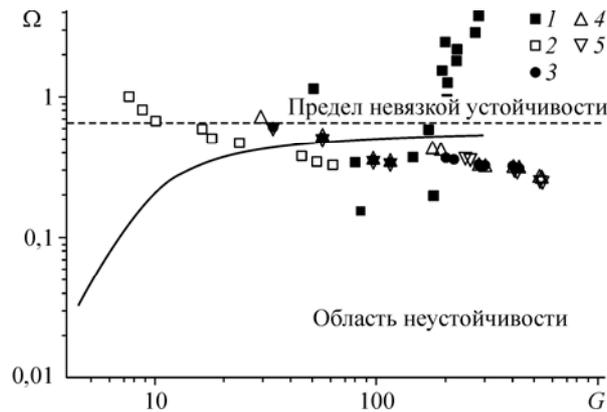


Рис. 7. Диаграмма устойчивости течения.  
Данные работ: [9] — 1, [7] — 2, [8] — (3–5).

из анализа и решения уравнений Орра–Зоммерфельда для амплитудных функций возмущений конвективной колонки в переменных

$$G = 4(Gr_z/4)^{1/4}, \quad \Omega = 32\pi f \rho z^2 / G^3 \mu,$$

где  $\rho$ ,  $\mu$  — плотность и коэффициент динамической вязкости газа.

Диаграмма устойчивости на рис. 7 описывает траекторию движения возмущения с постоянной физической частотой  $f$  и позволяет определить изменение амплитуды возмущения при его движении вниз по потоку, т. е. при увеличении  $z$  (или  $G$ ). При малых значениях  $G$  возмущения демпфируются, эта область отделена от области усиливающихся возмущений нейтральной кривой. Частота возмущений характеризуется безразмерной величиной  $\Omega$ . На рис. 7 представлены данные работы [9], полученные для конвективной струи с вибрационными возмущениями источника нагрева, данные работы [7] для конвективной струи под влиянием акустических возмущений. Остальные значки — результаты [8]. Анализ результатов на рис. 7 показывает, что основное течение в вихре усиливает акустические колебания, частота которых не превышает некоторого предельного значения, но все они, смещаясь вниз по потоку, в конце концов затухают.

Таким образом, было выяснено:

- тепловой смерч существует в узком диапазоне частот вращения (0,8–1,8 Гц), что свидетельствует о неустойчивости процессов течения газа в нем;
- экспериментально обнаружены частоты акустических колебаний  $f = 100, 200$  и  $300$  Гц, при которых смерч разрушается;
- корреляционный анализ свидетельствует о процессах подавления или дополнительной интенсификации турбулентных пульсаций в вихре типа торнадо, что, вероятно, и является причиной разрушения.

### Список литературы

1. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: ИТФ СО РАН, 2003. 504 с.
2. Наливкин Д.В. Ураганы, бури, смерчи. М.: Наука, 1969. 487 с.
3. Жигулев В.Н., Тумин А.М. Возникновение турбулентности. Новосибирск: Наука, 1987. 282 с.
4. Snegirev A.Yu., Marsden J.A., Fransis J., Makhviladze G.M. Numerical studies experimental observation of whirling flames // Inter. J. Heat and Mass Transfer. 2005. Vol. 57. P. 2523–2539.

5. **Loiseleux T., Chomaz J.M., Huerre P.** The effect of swirl on jets and wakes: linear instability of the Rankine vortex with axial flow // *Phys. Fluids*. 1998. Vol. 10, No. 5. P. 1120–1135.
6. **Голованов А.Н., Гришин А.М., Суков Я.В.** Физическое моделирование огненных смерчей // Доклады РАН. 2004. Т. 395, № 2. С. 196–198.
7. **Голованов А.Н.** Влияние акустических возмущений на свободноконвективное течение // ПМТФ. 2006. № 5. С. 25–31.
8. **Голованов А.Н., Гришин А.М., Колесников А.А., Строкатов А.А., Цвык Р.Ш.** Экспериментальное исследование тепловых и огненных смерчей // Доклады РАН. 2005. Т. 400, № 5. С. 618–620.
9. **Геххарт Б., Джалурия И., Махаджан Р., Саммакия Б.** Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. М.: Мир, 1991. 678 с.

*Статья поступила в редакцию 10 мая 2011 г.,  
после доработки — 19 августа 2011 г.*