

УДК 536.24, 534-13

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

### **О ФИЗИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ОДНОГО И ДВУХ ТЕПЛОВЫХ СМЕРЧЕЙ**

Экспериментально исследуются условия формирования и эволюции одного и двух смерчей, полученных в лабораторных условиях. Показано, что такой смерч можно отнести к вихрю Бюргера. Выяснено, что два смерча, расположенные рядом, могут как притягиваться, так и отталкиваться.

**Ключевые слова:** *физическое моделирование, тепловые смерчи.*

В огромном многообразии вихревых движений отчетливо выделяются концентрированные вихри, которые привлекают повышенный интерес с точки зрения, как фундаментальных исследований, так и практики [1, 2]. Достаточно четкое определение концентрированного вихря можно дать для случая идеальной жидкости: это локализованная в пространстве область с ненулевой завихренностью, окруженная потенциальным течением.

Среди природных явлений, имеющих отношение к концентрированным вихрям, несомненно, следует назвать смерчи. Однако именно смерчи и торнадо являются самыми неизученными по причине невозможности исследования их в природных условиях [3]. Поэтому моделирование тепловых смерчей в лабораторных условиях является актуальной задачей [4 – 8].

Целью данной работы является физическое моделирование теплового смерча типа торнадо в лабораторных условиях, исследование формирования и взаимодействия друг с другом двух смерчей [9]. В [10] показано, что если два вихря имеют одинаковую интенсивность, но вращаются в разные стороны, то они будут двигаться поступательно по горизонтальной подстилающей поверхности с сохранением расстояния между ними.

Объектом исследования был созданный в лабораторных условиях тепловой смерч. Моделирование осуществлялось с помощью экспериментальных установок, основанных на закрутке восходящего конвективного потока снизу (вращением нижнего основания) и сверху (вращением лопастей вентилятора). Для визуализации картины течения в смерче использовались частички канифоли, находящейся на нагревательном элементе.

На рис. 1 показано устройство экспериментальной установки, основанной на закрутке восходящего конвективного потока вращением нижнего основания [8]. Она состоит из электродвигателя 1, основания 2, регулятора напряжения 3, круглого диска 4 с закрепленным на нем источником тепла, выполненным в форме цилиндрического диска (плитки) 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  $\omega = (0 \div 1,8)$  Гц.

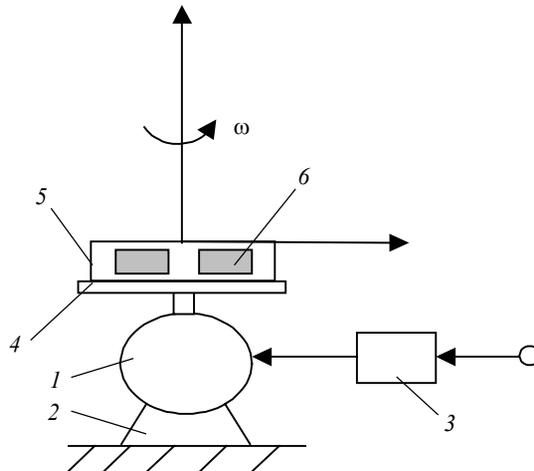


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для моделирования теплового смерча закруткой снизу [8]

На рис. 2 показано устройство экспериментальной установки, созданной для моделирования взаимодействия двух тепловых смерчей, основанной на закрутке восходящего конвективного потока вращением лопастей вентилятора (сверху), вентиляторы находились на расстоянии 200 мм от плиток. Расстояние между центрами плиток изменялось в пределах 200 – 300 мм. Установка состоит из двух вентиляторов 1, двух электрических плиток 2, нагревательных элементов 3, термоанометра 4, регулятора напряжения 5.

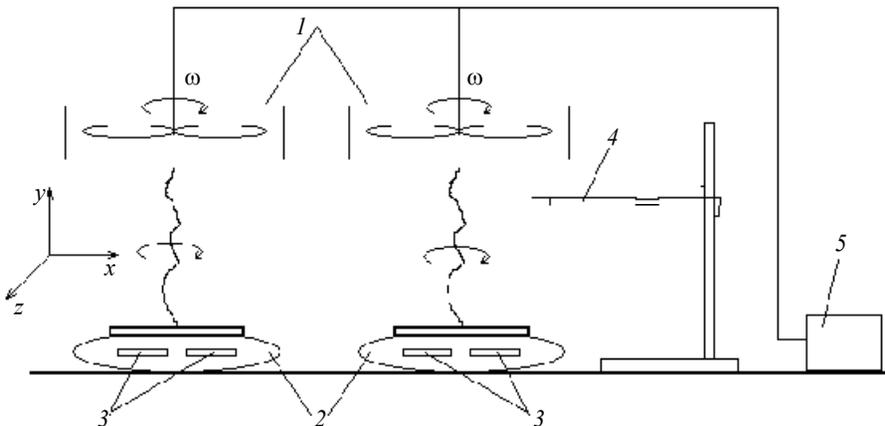


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для моделирования тепловых смерчей закруткой сверху

Экспериментальные методы измерений кинематических параметров нестационарных вихревых потоков достаточно сложны и требуют использования развитых и самых современных методов диагностики. В процессе проведения экспериментов измерялись: профили скорости  $w$  вдоль координаты  $y$  с помощью крыльчатого

анемометра и температуры  $T$  – термоэлектрическим методом с помощью хромель-алюмелевой термопары с диаметром спая  $2 \cdot 10^{-4}$  м; плотность теплового потока  $q$  – экспоненциальным методом с помощью датчика теплового потока с теплоизолированным чувствительным элементом из материала с высоким значением коэффициента удельной теплопроводности (из меди); контролировалась угловая скорость вращения основания с источником тепла.

Датчики для измерений  $T$ ,  $q$ ,  $w$  жестко крепились к штативу и помещались в рабочую часть теплового смерча. Время регистрации параметров струи в контрольной точке составляло (10÷15) с. Суммарные погрешности определения параметров не превышали:  $\delta T \leq 5\%$ ;  $\delta w \leq 9\%$ ;  $\delta q \leq 10\%$ . Также были проведены измерения скоростей с помощью термоанемометра ТПС-3 с погрешностью  $\delta V \leq 1,0\%$ .

При проведении экспериментов рассматривался вопрос о возникновении и дальнейшем поведении теплового смерча, а также об изменении его геометрических размеров. Устойчивый тепловой смерч формировался в достаточно узком диапазоне частот вращения основания (0,7÷1,8 Гц). Смерч становился неустойчивым при значениях ниже 0,7 Гц и выше 1,8 Гц, дальнейшие измерения проводились при частоте вращения 1,3 Гц.

В табл. 1 приведены геометрические размеры теплового смерча в зависимости от частоты вращения нижнего основания. Из таблицы видно, что с увеличением частоты растет высота и диаметр смерча, что совпадает с данными работы [8].

Таблица 1

Геометрические размеры теплового смерча

Частота вращения $f$ , Гц	Высота $h$ , м	Диаметр $d$ , м
0,7	$35 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
1,3	$50 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
1,8	$65 \cdot 10^{-2}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$

Полученные в лабораторных условиях вихревые структуры можно соотнести с вихрем Бюргера, у которого для эффективного радиуса  $r_m$  и вертикальной компоненты скорости  $w$  справедливы соотношения [1]

$$w = \alpha v, \quad r_m = 2,242(v/\alpha)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\alpha = \text{const}$ ,  $v$  – коэффициент кинематической вязкости.

Найдём эффективный радиус  $r_m$  теплового смерча, полученного в лабораторных условиях. Чтобы найти коэффициент  $\alpha$  и рассчитать  $r_m$ , воспользуемся уравнением для вертикальной скорости  $w$  и измеренными значениями скорости. Результаты расчётов приведены в табл. 2. Из анализа полученных данных видно, что тепловой смерч, полученный в лабораторных условиях, хорошо соотносится с моделью вихря Бюргера ( $d = 2r_m$ ).

Таблица 2

Расчет эффективного радиуса в модели вихря Бюргера

$h$ , м	$T$ , К	$w$ , м/с	$\nu, 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$	$\alpha$ , 1/с	$r_m, 10^{-3} \text{ м}$
0,2	324,4158	0,505	1,77	2,525	5,94
0,3	322,2892	0,605	1,77	2,016667	6,64
0,4	319,8082	0,65	1,77	1,625	6,93
0,5	313,4285	0,585	1,77	1,17	8,72



Рис. 3. Фотография теплового смерча при закрутке нижнего основания

На рис. 3 представлена фотография теплового смерча при закрутке нижнего основания.

Для исследования взаимодействия двух тепловых смерчей была использована экспериментальная установка, основанная на закрутке восходящей конвективной струи сверху, созданная авторами работы. На рис. 4 приведены фотографии одного и двух тепловых смерчей с закруткой сверху. Результаты исследования показали, что без воздействия второго теплового смерча первый представляет собой довольно устойчивую структуру. При исследовании двух тепловых смерчей наблюдалось взаимодействие их друг с другом, а точнее сближение и отталкивание (смещение осей смерчей относительно оси вентилятора).

На рис. 5 показаны профили измерения скоростей при помощи термоанемометра ТПС-3. Измерения проводились в нескольких точках на разных высотах с шагом 50 мм, начиная с 5 см над нагревательным элементом, как снизу вверх по оси  $Oy$ , так и слева на право по оси  $Ox$ .

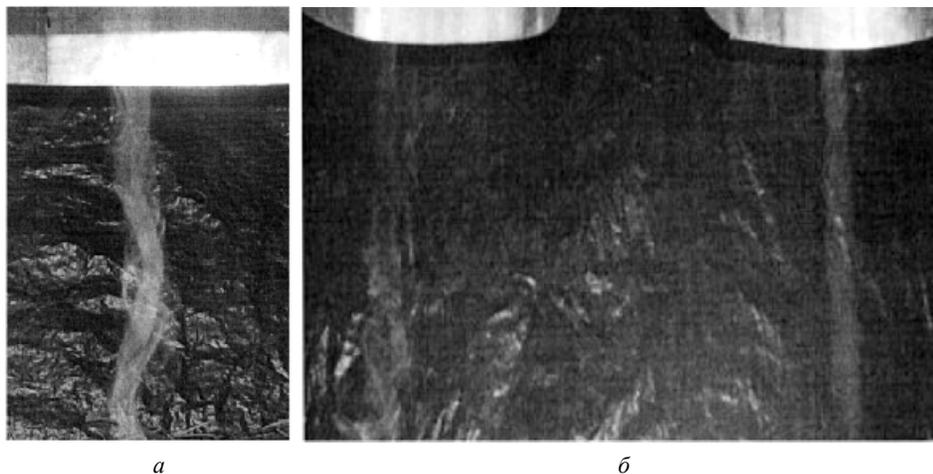


Рис. 4. Фотография одного (а) и двух (б) тепловых смерчей с закруткой сверху

Полученные результаты возможно интерпретировать следующим образом. На рис. 6 показана принципиальная схема течения газа при формировании двух смерчей, вращающихся по часовой стрелке.

Между двумя смерчами образуются тороидальные вихри, направление течения которых указано стрелками на рис. 6. Два тороидальных вихря, находящиеся между двумя смерчами, взаимодействуют между собой.

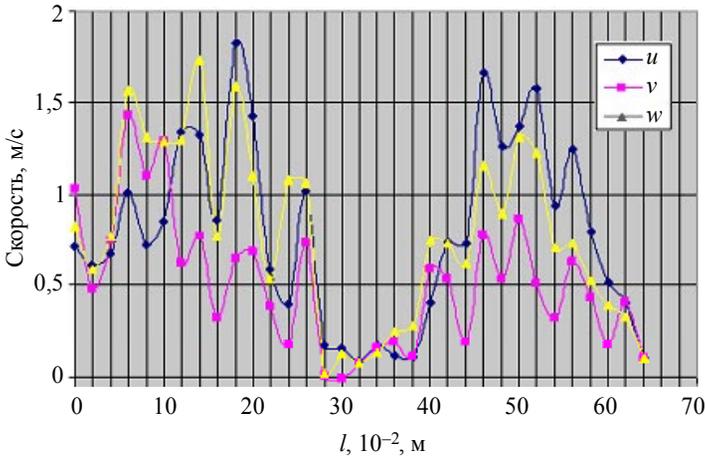


Рис. 5. Распределение скорости в двух тепловых смерчах, где  $u, v, w$  – скорости вдоль осей  $x, z, y$  соответственно

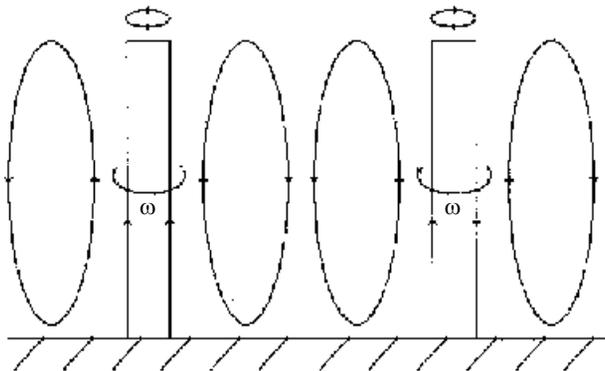


Рис. 6. Схема физической модели взаимодействия двух тепловых смерчей

На рис. 7 в области течения газа А скорости направлены в одну и ту же сторону, происходит суммирование векторов скоростей, что по интегралу Бернулли приводит к понижению давления, в результате чего смерчи сближаются. При сближении смерчей происходит вытеснение двух тороидальных вихрей, и смерчи начинают непосредственно взаимодействовать друг с другом.

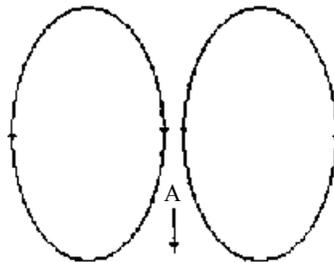


Рис. 7. Центральные тороидальные вихри

На рис. 8 показаны направления скорости двух смерчей, расположенных на малом расстоянии. В области течений газа В скорости направлены противоположно друг другу и давление в этой области повышается, и смерчи отталкиваются.

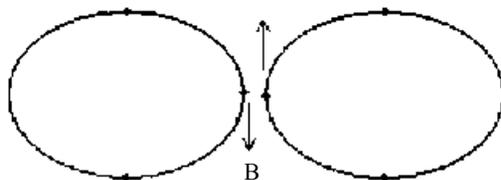


Рис. 8. Верхние тороидальные вихри

Данное предложение при взаимодействии двух смерчей, одновременно вращающихся по часовой стрелке, объясняет визуально наблюдаемые процессы сближения и отталкивания вихревых структур. Результаты исследования согласуются с теоретическими данными, приведенными в [9], на качественном уровне.

Таким образом, в результате проведенных исследований показано, что в открытом пространстве тепловые смерчи существуют при угловой частоте вращения  $f = (0.7 \div 1.8)$  Гц, что свидетельствует о неустойчивости процессов течения газа в них. Наблюдалось взаимодействие двух тепловых смерчей, их сближение и отталкивание. Предложено обоснование наблюдаемого взаимодействия двух смерчей друг с другом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: ИТФ СО РАН, 2003.
2. Наливкин Д.В. Ураганы, бури, смерчи. М.: Наука, 1969.
3. Интенсивные атмосферные вихри / под ред. Л. Бенгтссона, Дж. Лайтхилла. М.: Мир, 1985.
4. Самсонов В.П. Самопроизвольные вихревые структуры в пламени. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003.
5. Snegirev A.Yu., Mardsen J.A., Fransis J., and Makhviladze G.M. Numerical studies experimental observation of whirling flames // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2005. V. 57. P. 2523–2539.
6. Бубнов Б.М. Термическая структура и турбулизация торнадоподобных вихрей от локализованных источников тепла над вращающимся диском // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1997. Т. 33. № 5. С. 535–552.
7. Гришин А.М., Катаева Л.Ю. Математическая модель выброса жидкостей из прудовотстойников под действием интенсивного атмосферного смерча и ее приложения. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1999.
8. Голованов А.Н., Гришин А.М., Колесников А.А. и др. Экспериментальное исследование тепловых и огненных смерчей // ДАН. 2005. Т. 400. № 5.
9. Никулин В.В. Распад вертикального торнадоподобного вихря // ПМТФ. 1992. № 5. С. 52–57.
10. Гришин А.М. Физическое и математическое моделирование огненных смерчей // Изв. вузов. Физика. 2009. №2/2. С. 90–95.

*Grishin A.M., Golovanov A.N., Belousova A.O., and Matveev I.V.* ON PHYSICAL MODELING OF ONE AND TWO THERMAL TORNADOS. Conditions of formation and evolution of one and two tornados obtained in laboratory conditions are investigated experimentally. It is shown that such tornado can be considered as a Burgers vortex. It is found that two tornados located by a number, can as to be drawn and make a start.

Keywords: physical modeling, thermal tornadoes

*GRISHIN Anatolii Mikhailovich* (Tomsk State University)

E-mail: fire@mail.tsu.ru

*GOLOVANOV Aleksandr Nikolaevich* (Tomsk State University)

*BELOUSOVA Anna Olegovna* (Tomsk State University)

*MATVEEV Ivan Vasilyevich* (Tomsk State University)

E-mail: mivvas@mail.ru