

# Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

А. Ю. Вараксин, М. Э. Ромаш, В. Н. Копейцев, О возможностях визуализации при моделировании воздушных смерчей,  
*ТВТ*, 2010, том 48, выпуск 4, 617–622

<https://www.mathnet.ru/tvt776>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.168

20 апреля 2025 г., 10:04:04



## О ВОЗМОЖНОСТЯХ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВОЗДУШНЫХ СМЕРЧЕЙ

© 2010 г. А. Ю. Вараксин, М. Э. Ромаш, В. Н. Копейцев

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*

Поступила в редакцию 26.02.2009 г.

С использованием видеосъемки и различных методов визуализации продемонстрирована возможность изучения динамики свободных концентрированных вихрей, генерируемых в лабораторных условиях над нагреваемой снизу подстилающей поверхностью. Визуализация вихрей осуществлялась посредством частиц магнезии и дымовых частиц, а также путем применения плоского светового ножа (лазерного ножа). Изучены вопросы формирования и развития внутренней полости свободных воздушных вихрей, являющейся аналогом “глаза бури”.

### ВВЕДЕНИЕ

Каждый год атмосферные вихри различных масштабов (торнадо, ураганы) наносят огромный материальный ущерб и приводят к гибели людей [1–4]. К настоящему времени эффективные, экономически оправданные методы борьбы со стихией отсутствуют. Поэтому лабораторное исследование вопросов формирования и развития свободных воздушных вихрей, близких по своей структуре к атмосферным вихревым образованиям, является актуальной задачей.

Несмотря на то, что воздушные смерчи отличаются большим разнообразием форм, выделяют два основных типа [5]: плотные и расплывчатые смерчи. Плотные смерчи характеризуются наличием отчетливой резкой границы, значительной длиной и небольшим диаметром воронки, а также более или менее вертикальным положением. Расплывчатые смерчи обладают большой разрушительной силой. Данный тип смерчей характеризуется размытыми очертаниями, широкой и низкой воронкой, а также широкой полосой разрушений. Расплывчатые очертания таких смерчей и большие размеры приближают их к вихревым бурям и ураганам.

История наблюдения воздушных смерчей, считающаяся несколько столетий, показывает, что один и тот же смерч в начале и конце своего развития может обладать гладкой воронкой, т.е. являться плотным, а в середине своего существования (когда наносит наибольший вред) может становиться расплывчатым.

Данная работа является продолжением исследований [6–10], в которых была продемонстрирована принципиальная возможность генерации и изучения свободных концентрированных воздушных вихрей в лабораторных условиях. В [6, 7] были исследованы тепловые режимы нагрева подстила-

ющей поверхности, приводящие к генерации вихрей, а также проведены оценки их интегральных параметров (геометрические размеры, время жизни, скорость перемещения и др.) с использованием видеосъемки. В работе [8] получены пространственно-временные поля температур воздуха над подстилающей поверхностью и определен диапазон чисел Рэлея, при которых происходит образование свободных вихрей различной интенсивности. В [9, 10] предложен и апробирован в лабораторных условиях метод воздействия на воздушные смерчи, заключающийся в расположении на пути их распространения препятствий в виде вертикальных и горизонтальных сеток.

Цель настоящей работы – изучение возможностей визуализации свободных воздушных вихрей, генерируемых над нагреваемой снизу подстилающей поверхностью, а также вопросов их формирования и развития.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И СПОСОБЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Используемая в работе установка, параметры тепловых режимов, а также последовательность проведения экспериментов подробно описаны в [6]. Установка позволяет осуществлять контролируемый нагрев газовой горелкой (максимальная тепловая мощность – 3.5 кВт) подстилающей поверхности алюминиевого листа (диаметр – 1100 мм, толщина – 1.5 мм). Нагрев листа снизу приводит к генерации нестационарных вихревых структур вследствие создания над ним неустойчивой стратификации воздуха.

Эксперименты проводились при шести различных тепловых режимах, характеризующихся своими временами нагрева ( $\tau_h$ ), временами охлаждения ( $\tau_c$ ) и величиной максимальной темпера-

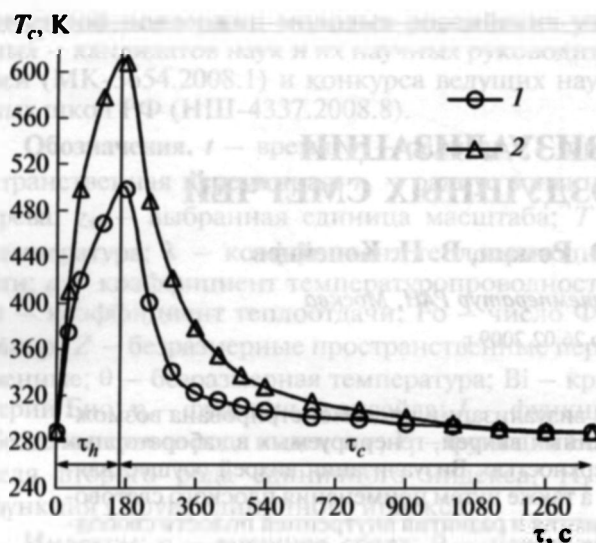


Рис. 1. Зависимости температуры в центре подстиляющей поверхности ( $r = 0$ ) от времени: 1 – режим № 3, 2 – режим № 6.

туры в центре подстиляющей поверхности ( $T_{cmax}$ ). Приводимые в данной работе результаты были получены при работе в режиме № 3 и режиме № 6 [6].

На рис. 1 показаны зависимости температуры в центре подстиляющей поверхности от времени  $T_c = T_c(\tau)$  для двух указанных режимов (№ 3 и № 6). Из приведенных данных видно, что эти режимы характеризуются одинаковым временем нагрева ( $\tau_h = 180$  с) и следующими значениями максимальных температур:  $T_{cmax} = 500$  К (режим № 3) и  $T_{cmax} = 610$  К (режим № 6).

На рис. 2 приведены зависимости температуры воздуха  $T_a = T_a(\tau)$  на расстоянии  $y = 50$  мм над центром подстиляющей поверхности для режимов № 3 и № 6. Можно сделать вывод, что температура воздуха значительно ниже температуры поверхности листа. Максимальное значение температуры воздуха равно  $T_a = 316$  К (режим № 3) и  $T_a = 334$  К (режим № 6).

Для визуализации воздушных вихрей использовалась схема, приведенная на рис. 3. Над подстиляющей поверхностью стола 1, в роли которой выступала верхняя зачерненная жаростойкой краской поверхность алюминиевого листа (марка Д16АМ), генерировались вихревые структуры 2. Использование непрерывного твердотельного лазера 3 отечественного производства (модель DTL-318), имеющего длину волны излучения 532 нм и выходную мощность 200 мВт, и оптической насадки 4 позволяло создавать плоский световой нож 5 (лазерный нож), располагаемый параллельно подстиляющей поверхности.

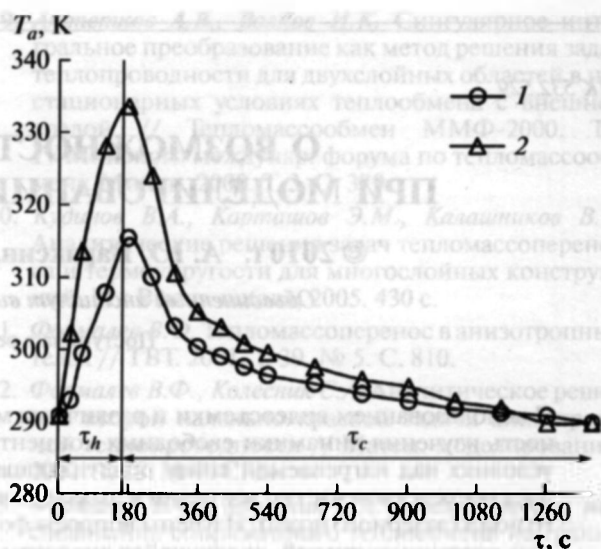


Рис. 2. Зависимости температуры воздуха ( $y = 50$  мм) от времени;  $r = 0$ : 1 – режим № 3, 2 – режим № 6.

Видеосъемка генерируемых вихрей проводилась с использованием цифровой видеокамеры 6 (модель Sanyo VCC-6572P, Япония), соединенной с персональным компьютером 7.

Для визуализации образуемых вихревых структур применялись частицы-трассеры (частицы магнетизи микрометровых размеров, химическая формула –  $4MgCO_2Mg(OH)_2 \cdot 4H_2O$ ), которые наносились тонким слоем на подстиляющую поверхность перед проведением экспериментов. Вторым способом осуществления визуализации генерируемых вихрей являлось использование дыма, получаемого при кипении предварительно наносимой на подстиляющую поверхность специальной жидкости (VDLSL5, фирма Velleman, Бельгия).

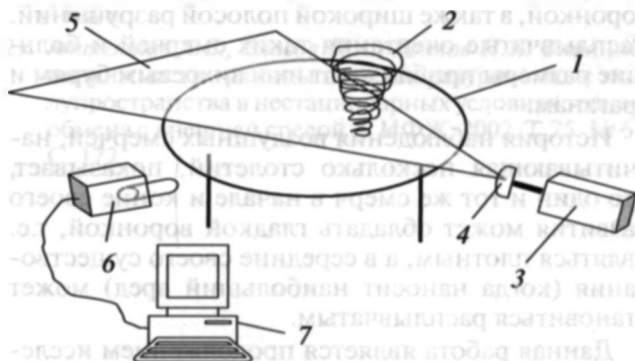
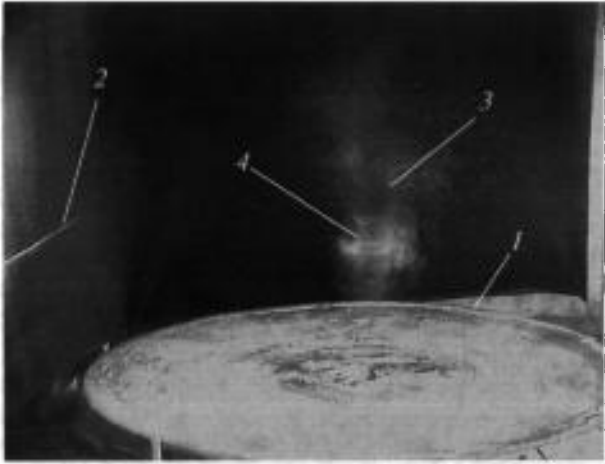
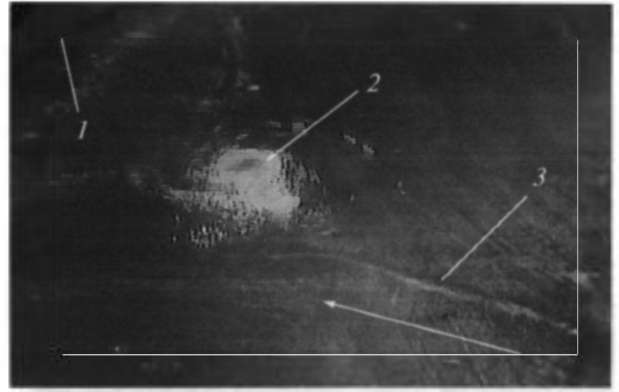


Рис. 3. Схема эксперимента по визуализации воздушных вихрей: 1 – верхняя (подстиляющая) поверхность стола, 2 – нестационарный вихрь, 3 – лазер, 4 – оптическая насадка, 5 – лазерный нож, 6 – цифровая видеокамера, 7 – персональный компьютер.



**Рис. 4.** Эксперимент по визуализации поперечного сечения воронки вихря (расстояние от лазерного ножа до поверхности равно 300 мм): 1 – край подстилающей поверхности, 2 – след лазерного ножа на стене, 3 – воздушный вихрь, 4 – сечение вихря лазерным ножом (“глаз вихря”).



**Рис. 5.** Эксперимент по визуализации поперечного сечения воронки вихря (расстояние от лазерного ножа до поверхности равно 100 мм): 1 – край подстилающей поверхности, 2 – сечение вихря лазерным ножом, 3 – след, оставленный вихрем на подстилающей поверхности. Стрелка показывает направление движения вихря.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Использование частиц магнезии и частиц дыма, а также лазерного ножа позволяло осуществлять визуализацию генерируемых над подстилающей поверхностью вихревых структур, а видеосъемка – изучать их динамику.

Ниже приведены и проанализированы некоторые данные по изучению геометрии и динамики воронки вихря. Воронка воздушного смерча (торнадо) в общем случае состоит из внутренней полости и быстровращающейся стенки, расположенной вокруг нее [5]. Внутренняя полость воронки является своеобразным аналогом “глаза бури” – области тропического циклона (урагана) [5], свободной от облаков. Воздух попадает в нее сверху за счет низкого давления в центре урагана.

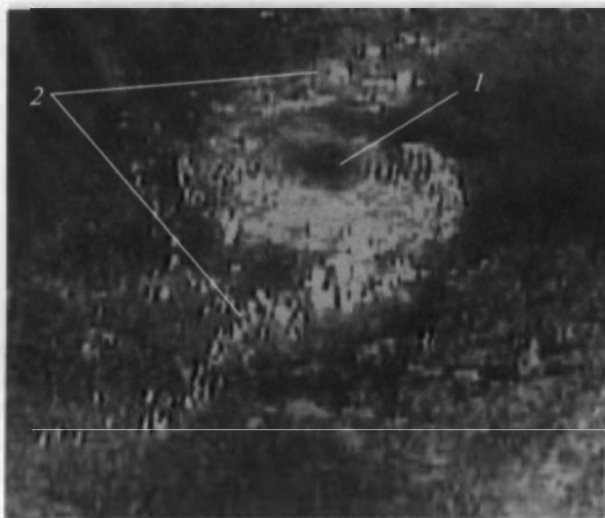
На рис. 4 приведен типичный кадр видеозаписи эксперимента по визуализации поперечного сечения воронки вихря. Работа проводилась при тепловом режиме № 6. Как показали предыдущие исследования [6], именно при этом режиме происходила генерация наиболее крупных и долгоживущих вихревых структур. В данном случае визуализация воздушного вихря осуществлялась посредством частиц магнезии. Момент генерации вихревой структуры определялся по началу уноса частиц магнезии с подстилающей поверхности. На приведенной фотографии отчетливо виден воздушный вихрь, а также его сечение лазерным ножом в виде “кольца”. Отсутствие во внутренней полости частиц магнезии наглядно свидетельствует о наличии в этой области нисходящего потока воздуха, при котором взвешивание частиц-трассеров и их унос с подстилающей поверхности исключен.

Выборочный кадр видеозаписи эксперимента по визуализации поперечного сечения воронки приведен также на рис. 5. В отличие от рис. 4 воздушный вихрь на этом кадре является невидимым. Это следствие того, что количество частиц магнезии, нанесенных на подстилающую поверхность, при проведении данного эксперимента было мало. Тем не менее взвешенные вихревой структурой частицы, попадая в плоскость лазерного ножа, интенсивно рассеивали свет и тем самым визуализировали поперечное сечение воронки вихря.

На рис. 5 отчетливо виден след, оставленный вихревой структурой на подстилающей поверхности. Данный след в [7] отнесен к типу “линия”. С учетом того, что кадр, приведенный на рис. 5, соответствует моменту времени 1.5 с от момента возникновения вихря, а длина следа составляет примерно 0.18 м, получаем среднюю скорость перемещения основания, равную 0.12 м/с.

На рис. 6 показан увеличенный фрагмент типичного кадра видеозаписи по визуализации воронки вихря. Увеличение привело к некоторому размытию изображения поперечного сечения воронки. Тем не менее рис. 6 позволяет сделать вывод о спиральном строении воронки вихря, что является убедительным свидетельством сходства его гидродинамической структуры со строением ураганов.

Покадровый анализ видеозаписей позволяет получать информацию о следующих параметрах воронки: 1) диаметр воронки вихря; 2) толщина стенки вихря; 3) направление вращения стенки вихря; 4) линейная скорость перемещения воронки вихря. Использование режима “ускорение/замедление” видеозаписи позволяет также производить грубые оценки частоты вращения воронки.



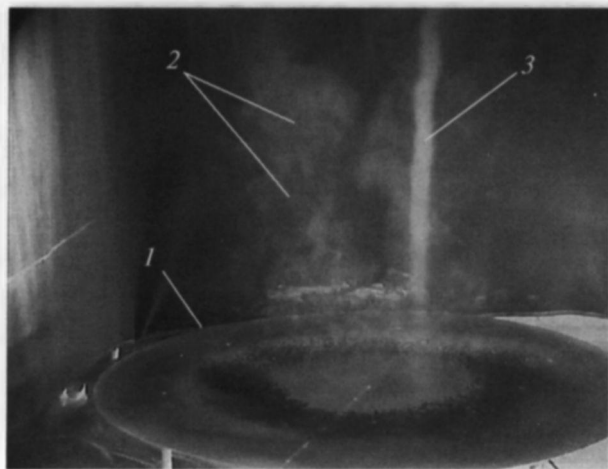
**Рис. 6.** Эксперимент по визуализации поперечного сечения воронки вихря (расстояние от лазерного ножа до поверхности равно 100 мм, размер изображения: 192 × 160 мм): 1 – внутренняя полость воронки вихря, 2 – спиралевидные ответвления, формирующие стенку воронки вихря.

Многочисленные повторения экспериментов позволило сделать следующие заключения о геометрии воронки вихрей и их динамики. Максимальный диаметр воронки вихря достигал 6–10 см при толщине стенок 2–3 см. Преимущественным направлением вращения стенок наблюдаемых вихрей было вращение против часовой стрелки (если смотреть на подстилающую поверхность сверху). Линейная скорость перемещения воронки вихря изменялась в диапазоне от 5 до 20 см/с. Максимальная частота вращения воронки вихрей достигала 10–15 оборотов в секунду.

В работе были получены результаты, касающиеся динамики формирования и распада воронки вихря. В данном случае визуализация воздушного вихря осуществлялась при помощи дымовых частиц.

Выборочные кадры, показанные на рис. 7 и рис. 8, были получены при работе при тепловом режиме № 3. Предыдущие исследования [6] показали, что время жизни генерируемых при этом режиме вихрей, как правило, было меньше по сравнению с режимом № 6.

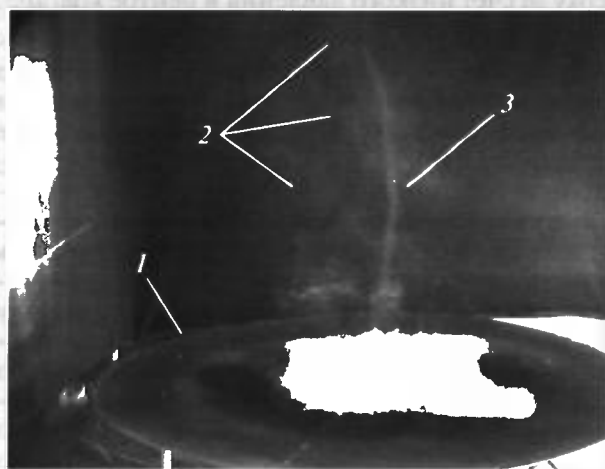
Наблюдаемое многократно в экспериментах развитие вихревых структур происходило следующим образом. Из-за вращения воздуха возникает область пониженного давления, в которой “собираются” частицы дыма. Таким образом, сначала образуется вихревая нить (см. рис. 7), являющаяся аналогом плотного смерча со сплошной воронкой-стенкой (внутренняя полость отсутствует). Ускорение вращения такой воронки приводит к еще большему понижению давления в ее центре. Это способствует проникновению в воронку холодного воздуха сверху, что приводит к формиро-



**Рис. 7.** Типичный кадр с зафиксированной вихревой нитью в основной стадии развития (дымовая визуализация): 1 – край подстилающей поверхности, 2 – дым, 3 – воздушный вихрь.

ванию внутренней полости вихря – “глаза вихря”, являющегося аналогом “глаза бури”.

К сожалению, низкое разрешение отдельных кадров видеозаписи не позволило привести их в статье, однако на видеозаписи отчетливо видно формирование внутренней полости вихря, в которой отсутствуют дымовые частицы. По-видимому, в этой области реализуется нисходящее движение холодного воздуха, проникающего сверху. Скорость воздуха в этой области невелика, однако давление там низкое. Равновесие между градиентом давления и центробежной силой и формирует внутреннюю полость. В стенке вихря реализуется восходящее движение воздуха, характеризующее-



**Рис. 8.** Типичный кадр с зафиксированной вихревой нитью в стадии распада (дымовая визуализация): 1 – край подстилающей поверхности, 2 – дым, 3 – воздушный вихрь.

ся высокими значениями скорости. Высокая скорость предопределяет наличие области низкого давления, способствующей вовлечению в нее очередных порций теплого воздуха, находящегося вблизи подстилающей поверхности.

По мере того, как приток теплого воздуха ослабевает, скорость восходящего течения снижается, давление в стенке повышается, что приводит к смыканию внутренней полости. Визуально это выражается в утончении вихревой нити, ее искривлении (см. рис. 8) и последующем обрыве.

Описанный выше и многократно наблюдаемый при проведении работы сценарий жизненного цикла вихря совпадает с многочисленными описаниями очевидцев [5] и имеющимися видеозаписями и фотографиями реальных смерчей.

На рис. 9 приведены фотографии реального торнадо плотного типа в двух стадиях его существования. На рис. 9а показана основная стадия существования смерча, которая является самой продолжительной и наносящей максимальные разрушения. Во время этой стадии воронка может менять свои очертания, сохраняя при этом хоботообразную или столбообразную форму. На рис. 9б приведена конечная стадия смерча (или его распад). Эта стадия начинается со снижения скорости вращения, приводящего к оседанию каскада, видимому сужению воронки смерча и ее изгибу. Таким образом, воронка меняет свою форму с хоботообразной на змееобразную. Каскад также уменьшается в размере. Далее происходит разрыв воронки, и она, поднимаясь, исчезает в облаке. Каскад довольно быстро прекращает свое существование.

Несложно сделать вывод о схожести полученных в экспериментах вихрей с реальными воздушными смерчами путем сравнения рис. 7 и 8 с рис. 9а и 9б соответственно.

Проведенные эксперименты позволили также сделать следующий важный вывод. При работе в “жестком” тепловом режиме (режим № 6) зачастую происходила генерация вихревых структур, близких по своему строению к расплывчатым смерчам (см. Введение), в то время как при работе в более “мягком” тепловом режиме (режим № 3) наблюдались преимущественно воздушные вихри, близкие по своей структуре к плотным торнадо.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана эффективность различных способов визуализации свободных концентрированных вихрей при исследовании их динамики в лабораторных условиях. Изучение динамики воздушных вихрей проводилось путем покадрового анализа видеозаписей. Использование плоского светового ножа (лазерного ножа) совместно с визуализацией посредством частиц магнезии и ды-

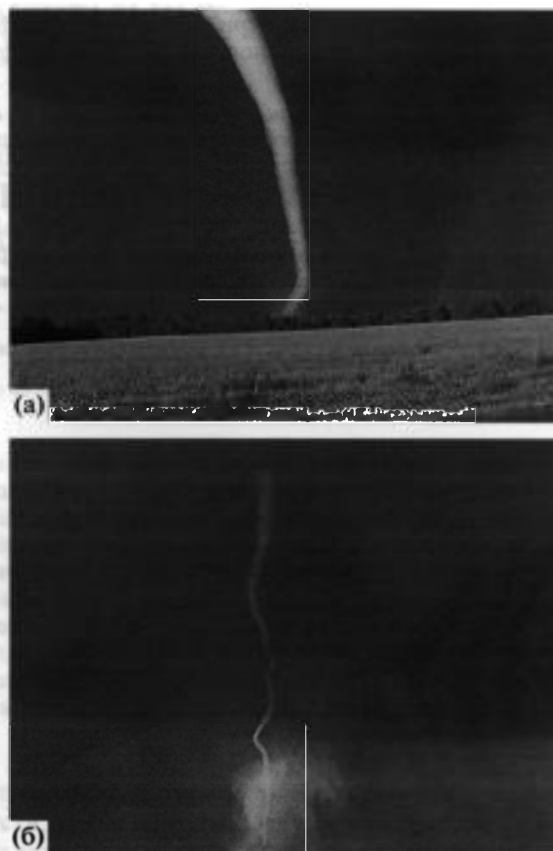


Рис. 9. Фотография реального торнадо в штате Канзас (фотограф Lanny Dean, [www.photolib.noaa.gov](http://www.photolib.noaa.gov)): (а) – основная стадия, (б) – конечная стадия (распад).

мовых частиц позволили исследовать вопросы формирования и развития воронки вихрей.

Работа выполнена при частичной поддержке межсекционной Программы фундаментальных исследований ОЭММПУ РАН “Фундаментальные проблемы горения и детонации в энергетике” и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08-08-00743).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ashley W.S. Spatial and Temporal Analysis of Tornado Fatalities in the United States: 1880–2005 // *Weather and Forecasting*. 2007. V. 22. P. 1214.
2. Franklin J.L., Pasch R.J., Avila L.A. et al. Atlantic Hurricane Season of 2004 // *Monthly Weather Review*. 2006. V. 134. P. 981.
3. Beven II J.L., Avila L.A., Blake E.S. et al. Atlantic Hurricane Season of 2005 // *Monthly Weather Review*. 2008. V. 136. P. 1109.
4. Franklin J.L., Brown D.P. Atlantic Hurricane Season of 2006 // *Monthly Weather Review*. 2008. V. 136. P. 1174.

5. *Наливкин Д.В.* Ураганы, бури и смерчи. Географические особенности и геологическая деятельность. Л.: Наука, 1969. 487 с.
6. *Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н., Таекин С.И.* О возможности физического моделирования воздушных смерчей в лабораторных условиях // ТВТ. 2008. Т. 46. № 6. С. 957.
7. *Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Таекин С.И., Копейцев В.Н.* Генерация свободных концентрированных воздушных вихрей в лабораторных условиях // ТВТ. 2009. Т. 47. № 1. С. 84.
8. *Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н., Таекин С.И.* Параметры неустойчивой стратификации воздуха, приводящей к генерации свободных вихрей // ТВТ. 2010. Т. 48. № 2. С. 269.
9. *Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н.* О возможности воздействия на вихревые атмосферные образования // ТВТ. 2010. Т. 48. № 3. С. 433.
10. *Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н.* К вопросу управления поведением воздушных смерчей // ТВТ. 2009. Т. 47. № 6. С. 870.