

УДК 532.527

М.А. Горбачев, А.Ю. Вараксин, М.Э. Ромаш, В.Н. Копейцев

Объединенный институт высоких температур РАН, Россия,  
125412, Москва, Ижорская ул., 13 (стр. 2), E-mail: varaksin\_a@mail.ru

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СВОБОДНЫХ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ВИХРЕЙ

*Представлено описание экспериментальной установки для генерации свободных концентрированных тепловых вихрей. Выявлены тепловые режимы, а также измерено пространственно-временное поле температур, при которых неустойчивая стратификация приводит к образованию свободных вихрей. Продемонстрирована возможность изучения динамики свободных концентрированных вихрей с использованием видеосъемки и различных методов визуализации. Изучены вопросы формирования и развития внутренней полости свободных воздушных вихрей. Получены мгновенные поля скоростей в поперечных сечениях вихревых структур.*

ВИХРЕВЫЕ ПОТОКИ, ТОРНАДО-ПОДОБНЫЕ ПОТОКИ, ФИЗИЧЕСКОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ

### ВВЕДЕНИЕ

Вихревое движение – одно из основных состояний движущейся сплошной среды. Примечательно, что во многих случаях завихрённость локализуется в пространстве, вследствие чего формируются концентрированные вихри, которые привлекают повышенный интерес с точки зрения как фундаментальных исследований, так и практики. Вихревые потоки чрезвычайно широко распространены в природе (атмосферные циклоны, песчаные бури, воздушные смерчи, тайфуны, лесные пожары) и находят свое применение во многих технических приложениях (вихревые трубы, циклонные сепараторы, центробежные форсунки, вихревые ячейки, различные турбулизаторы и т.п.).

Сложность и многообразие реальных концентрированных вихрей приводит к большим трудностям, как при математическом описании, так и экспериментальном исследовании. Решение трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса для столь сложного гидродинамического и теплофизического объекта, каковым является концентрированный вихрь, даже с учетом динамики развития методов прямого численного моделирования (DNS-метод, LES-метод и др.) вряд ли осуществимо в ближайшее время в силу чрезвычайной сложности постановки граничных и начальных условий. По-видимому, больший эффект для понимания физики и построения теории вихревых течений будут иметь простые аналитические или полуэмпирические модели. Вследствие этого, постановка целенаправленных экспериментальных исследований, результаты которых позволяют проводить верификацию имеющихся и способствовать созданию новых математических моделей вихревых потоков, представляется актуальной задачей.

Типичными проявлениями свободных концентрированных вихрей в природе являются такие разрушительные явления как смерчи, наносящие ежегодно многомиллионный урон экономике и уносящие сотни человеческих жизней [1 – 4]. Эффективных средств защиты от столь непредсказуемого и, безусловно, неконтролируемого проявления сил природы – нет. В

настоящий момент среди сведений, относящихся к смерчам, имеются результаты фото и киносъемок, словесные описания очевидцев и следы деятельности смерчей, а также результаты радиолокационных наблюдений, но этого явно недостаточно. Таким образом, воссоздание аналогичных природным свободных концентрированных вихрей в лабораторных условиях с целью сбора экспериментальной информации по основным параметрам вихря представляется актуальной задачей.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

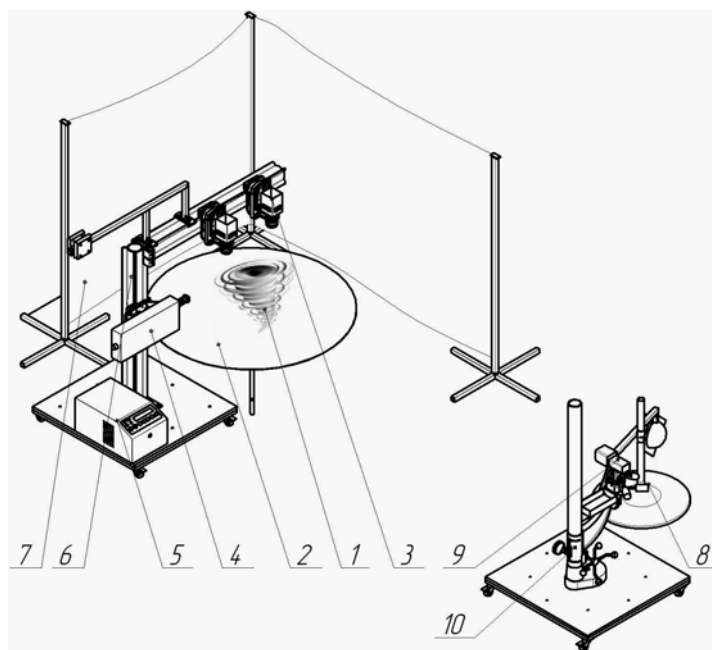
Подробное описание используемой экспериментальной установки, параметров тепловых режимов, а также последовательности проведения экспериментов дано в работах [5 – 7]. Установка позволяет осуществлять контролируемый нагрев газовой горелкой (максимальная тепловая мощность – 3,5 кВт) подстилающей поверхности 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 на шести различных тепловых режимах, характеризующихся своими временами нагрева ( $\tau_h$ ), временами охлаждения ( $\tau_c$ ) и величиной максимальной температуры в центре подстилающей поверхности ( $T_{max}$ ). Приводимые ниже результаты были получены при работе на режиме № 3 [5], для которого  $\tau_h = 180$  с,  $\tau_c = 1200$  с,  $T_{max} = 500$  К, а также на режиме № 6 [5], для которого  $\tau_h = 180$  с,  $\tau_c = 1200$  с,  $T_{max} = 610$  К.

В процессе проведения экспериментов также контролировалась температура воздуха в комнате. Начальное (перед началом экспериментов) различие в температурах воздуха на уровне расположения подстилающей поверхности  $T_1$  и вблизи потолка комнаты  $T_2$  составляло  $\Delta T = T_2 - T_1 \approx 1^\circ\text{C}$ . Максимальный рост температуры воздуха вблизи потолка после проведения единичного эксперимента на одном тепловом режиме достигал  $\Delta T \approx 3 - 4^\circ\text{C}$ . Дальнейшие опыты проводились после полного «расхолаживания» комнаты до начальных значений температур.

Для визуализации воздушных вихрей использовалась схема, приведенная на рис. 1. Свободная вихревая структура 1 генерировалась над подстилающей поверхностью стола 2, в роли которой выступала верхняя зачерненная жаростойкой краской поверхность алюминиевого листа (марка Д16АМ). Фотосъемка осуществлялась скоростными фотокамерами 3 в горизонтальном сечении лазерного ножа. Использование непрерывного твердотельного лазера 4 отечественного производства и оптической насадки позволяло создавать плоский световой нож (лазерный нож), располагаемый параллельно подстилающей поверхности. Синхронизация фотокамер и лазера, а также связь с персональным компьютером осуществлялась по средствам блока синхронизации 5. Измерительный комплекс располагался на раме 6, позволявшей изменять высоту лазерного ножа над подстилающей поверхностью и относительное расположение фотокамер. Для создания фона съемки использовалось полотно 7. Освещение области съемки осуществлялось лампами, установленными на стойке 8. Видеосъемка генерируемых вихрей проводилась с использованием цифровой видеокамеры 9 (модель Sanyo VCC-6572P, Япония), закрепленной на штативе 10.

Для визуализации образуемых вихревых структур использовались частицы-трассеры (частицы магнезии микрометровых размеров), которые наносились тонким слоем на подстилающую поверхность перед проведением экспериментов либо дым, получаемый при кипении специальной жидкости (VDLSL5, фирма Velleman, Бельгия).



1 – свободный концентрированный вихрь; 2 – подстилающая поверхность; 3 – цифровая фотокамера; 4 – лазер; 5 – блок синхронизации; 6 – рама; 7 – фоновое полотно; 8 – стойка освещения; 9 – цифровая видеокамера; 10 – штатив

Рис. 1. Схема эксперимента по визуализации воздушных вихрей

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР

Получение зависимостей температуры по радиусу подстилающей поверхности и времени на различных режимах проводилось следующим образом: 1) контроль «непрогретости» поверхности путем измерения  $T = T(r) = const$ ; 2) включение газовой горелки; 3) нагрев подстилающей поверхности в течение времени  $\tau_h$  для получения распределения  $T = T(r, t)$ ; 4) отключение газовой горелки; 5) охлаждение подстилающей поверхности в течение времени  $\tau_c$  для получения распределения  $T = T(r, t)$ .

Из экспериментальных данных ясно, что температура воздуха значительно ниже температуры поверхности листа. Максимальное значение температуры воздуха (на режиме № 6) равно  $T_a = 334$  К при  $\tau_h = 180$  с. Распределение температуры воздуха неоднородно; максимальные градиенты температуры воздуха реализуются в кольцевой области ( $150 \text{ мм} < r < 250 \text{ мм}$ ), там же, где реализуются и максимальные градиенты температуры подстилающей поверхности. В указанной области преимущественным образом и происходила генерация вихревых структур. Некоторое повышение температуры в периферийной области подстилающей поверхности ( $r > 400 \text{ мм}$ ), объясняется, по-видимому, наличием восходящих потоков теплого воздуха из-под листа вследствие работы газовой горелки. При  $\tau = \tau_h = 180$  с (в момент отключения горелки) температура воздуха принимает значения  $T_a = 332$  К и  $T_a = 317$  К при  $r = 100$  мм и  $r = 200$  мм соответственно. Данные значения температур позволяют сделать оценку максимального горизонтального градиента температуры воздуха на расстоянии  $y = 50$  мм от поверхности листа:  $\partial T_a / \partial r \approx -150$  К/м.

Распределение температуры воздуха по вертикали неоднородно. При  $\tau = \tau_h = 180$  с (в момент отключения горелки) температура воздуха принимает значения  $T_a = 334$  К,  $T_a = 330$  К,  $T_a = 321$  К и  $T_a = 313$  К при  $y = 50$  мм,  $y = 100$  мм,  $y = 200$  мм и  $y = 300$  мм соответственно. Указанные данные позволяют сделать вывод о практически линейном уменьшении температуры с высотой в исследованном диапазоне расстояний от листа и постоянстве вертикального градиента температуры воздуха, а также провести его оценку:  $\partial T_a / \partial y \approx -80$  К/м.

Полученные распределения температуры воздуха позволили провести оценки величины безразмерного теплового критерия – числа Рэлея, определяющего соотношение

между силами плавучести и вязкости, для различных тепловых режимов. Данный критерий определялся следующим образом:

$$Ra = \frac{g h^3 \beta \Delta T}{\nu a} \quad (1)$$

Для выполнения оценок в качестве  $h$  принималось расстояние по вертикали от подстилающей поверхности до значения  $y$ , на котором температура воздуха лишь на 10 К превышает аналогичное значение в окружающей среде. Коэффициенты объемного расширения, кинематической вязкости и температуропроводности  $\beta$ ,  $\nu$  и  $a$  брались для параметров окружающего воздуха.

Полученные в результате оценок зависимости числа Рэлея от времени для различных тепловых режимов приведены на рис. 2. Эксперименты отчетливо показали, что устойчивая генерация вихрей наблюдалась на всех режимах за исключением режима № 1 [5]. Следовательно, число Рэлея  $Ra \approx 10^7$  может быть принято за некоторое минимальное значение, при котором начинается образование вихрей. Самые крупные вихри генерировались при работе на режимах № 5 и № 6 [5], что соответствует  $Ra \geq 10^9$ . На рис. 2 приведены две горизонтальные линии, соответствующие числам Рэлея:  $Ra = 10^7$  и  $Ra = 10^9$ . С их помощью легко определить временные диапазоны существования относительно мелких ( $10^7 < Ra < 10^9$ ) и крупных ( $Ra > 10^9$ ) вихревых структур для различных тепловых режимов. Полученные диапазоны хорошо согласуются с данными экспериментов по генерации вихрей на режимах нагрева, а также охлаждения подстилающей поверхности.

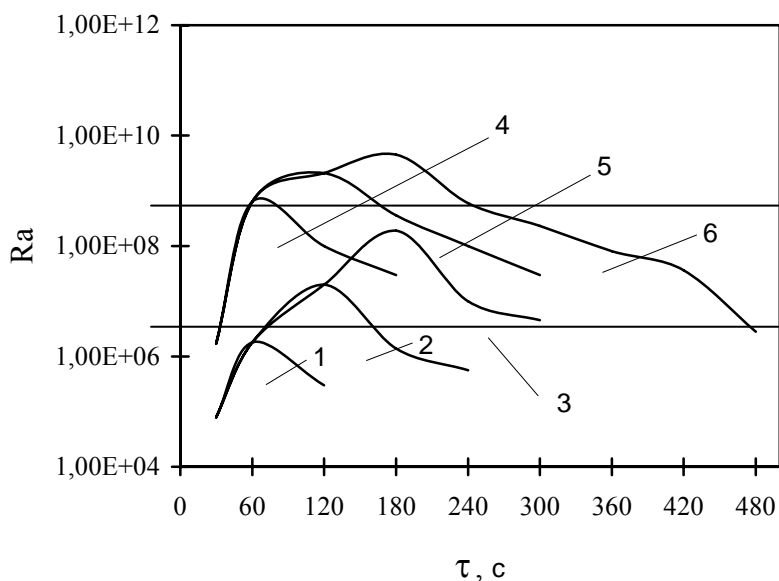


Рис. 2. Зависимости числа Рэлея от времени для различных тепловых режимов ( $r = 0$ ): 1 – режим № 1; 2 – режим № 2; 3 – режим № 3; 4 – режим № 4; 5 – режим № 5; 6 – режим № 6

## ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР

Видеосъемка и использование частиц-трассеров позволили осуществить визуализацию возникающих над подстилающей поверхностью вихревых структур.

Покадровый анализ видеозаписей на различных тепловых режимах позволяет получать информацию о следующих параметрах процесса генерации вихрей и характеристиках последних: 1) значения температур, при которых происходит генерация вихрей; 2) область подстилающей поверхности, где происходит образование вихрей; 3) направление вращения вихревой структуры; 4) количество наблюдаемых вихрей за один эксперимент; 5) траектория перемещения основания вихревой структуры; 6) длина траектории основания вихря; 7)

скорость перемещения основания вихря; 8) время жизни (существования) вихревой структуры; 9) высота вихрей; 10) диаметр вихрей и др.

Многочисленные повторения экспериментов на различных режимах позволили сделать следующие выводы. Устойчивая генерация вихрей наблюдалась на всех режимах за исключением режима № 1 [5]. Вихревые структуры начинали образовываться в режиме нагрева подстилающей поверхности при достижении температуры в ее центре значения  $T_c = 470$  К. Самые крупные вихри генерировались при температурах в центре поверхности  $T_c > 570$  К. Образование вихревых структур происходило преимущественным образом в кольцевой области ( $150 \text{ мм} < r < 250 \text{ мм}$ ), т.е. в области резкого роста градиента температуры. Преимущественного направления вращения вихрей (против часовой стрелки или по часовой стрелке) выявлено не было. Количество наблюдаемых вихревых структур – до 10 за один эксперимент. Было обнаружено два типа траекторий движения основания вихрей. Большинство вихревых структур двигалось по спиральным траекториям (траектории первого типа) в пределах кольцевой области ( $150 \text{ мм} < r < 250 \text{ мм}$ ), где происходила их генерация. Некоторые вихри перемещались практически по кратчайшим почти прямолинейным траекториям (траектории второго типа) из области генерации к краю подстилающей поверхности, где они распадались. Максимальная длина траектории основания вихревых структур составляла 50 – 70 см при скорости перемещения 5 – 10 см/с. Таким образом, предельное время жизни наблюдаемых вихрей составляло около 10 с. Наибольшая высота генерируемых вихревых структур достигала 0,5 м, а их максимальный диаметр – 0,3 м.

При работе на более «мягких» режимах (№ 2 и № 3) количество наблюдаемых вихрей за один эксперимент и их геометрические размеры были меньшими, чем при работе на «жестких» режимах (№ 4, № 5 и № 6).

## ДИНАМИКА ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР

Среди реальных вихрей выделяют два основных типа воздушных смерчей [8]: 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 их большие размеры приближают их к вихревым бурям и ураганам. Один и тот же смерч в начале и конце своего развития может обладать гладкой воронкой, то есть являться плотным, а в середине своего существования (когда наносит наибольший вред) может становиться расплывчатым.

Воронка воздушного смерча (торнадо) в общем случае состоит из внутренней полости и быстровращающейся стенки, расположенной вокруг нее [8]. Внутренняя полость воронки является своеобразным аналогом «глаза бури» – области тропического циклона (урагана) [8], свободной от облаков. Воздух попадает в нее сверху за счет низкого давления в центре урагана.

В эксперименте были получены результаты, касающиеся динамики формирования и распада воронки вихря. В данном случае визуализация воздушного вихря осуществлялась при помощи частиц магнезии. Типичная фотография наблюдаемых в эксперименте воздушных вихрей приведена на рис. 3а. На рис. 3б показана для сравнения фотография реального воздушного смерча в Северной Америке.

Выборочные кадры, показанные на рис. 4, были получены при работе на тепловом режиме № 3. Предыдущие исследования [5] показали, что время жизни генерируемых на 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

(рис. 4), 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 формированию внутренней полости вихря – «глаза вихря», являющегося аналогом «глаза бури». По-видимому, в этой области реализуется нисходящее движение холодного воздуха, проникающего сверху. В стенке вихря реализуется восходящее движение воздуха, характеризующееся высокими значениями скорости. Высокая скорость предопределяет наличие области низкого давления, способствующей вовлечению в нее очередных порций теплого воздуха, находящегося вблизи подстилающей поверхности.

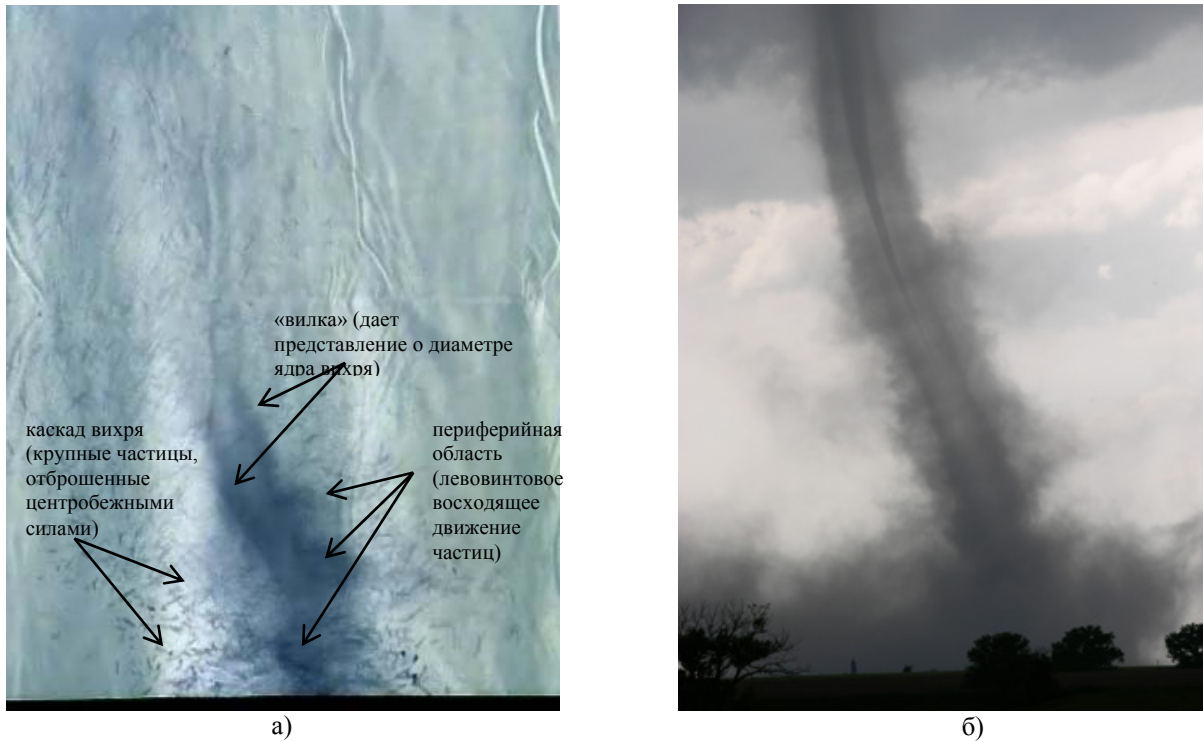


Рис.3. Фотографии: а) – наблюдаемые в эксперименте воздушные вихри; б) – воздушный смерч в Северной Америке

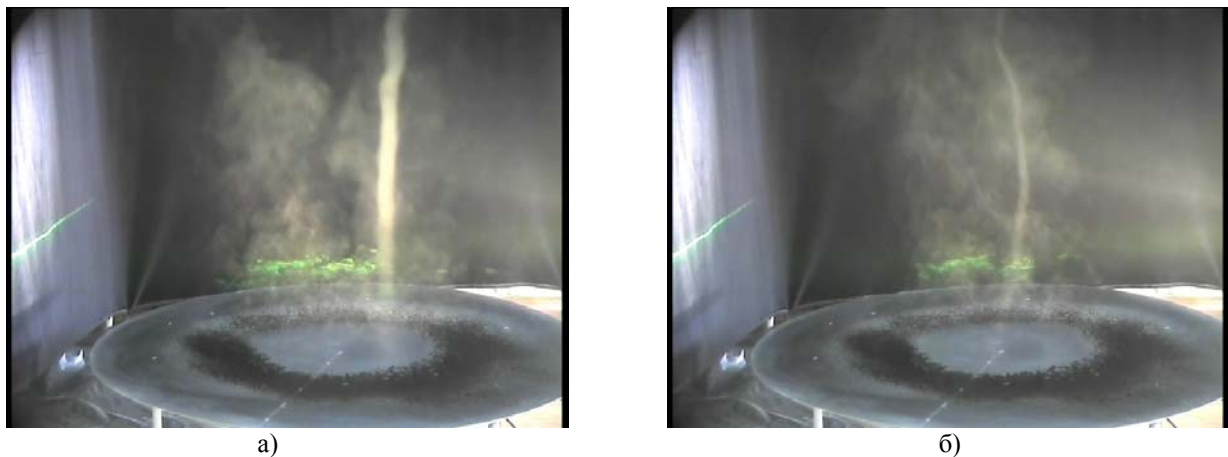


Рис. 4. Типичный кадр с зафиксированной вихревой нитью (дымовая визуализация): а) – основная стадия развития; б) – стадия распада





а)

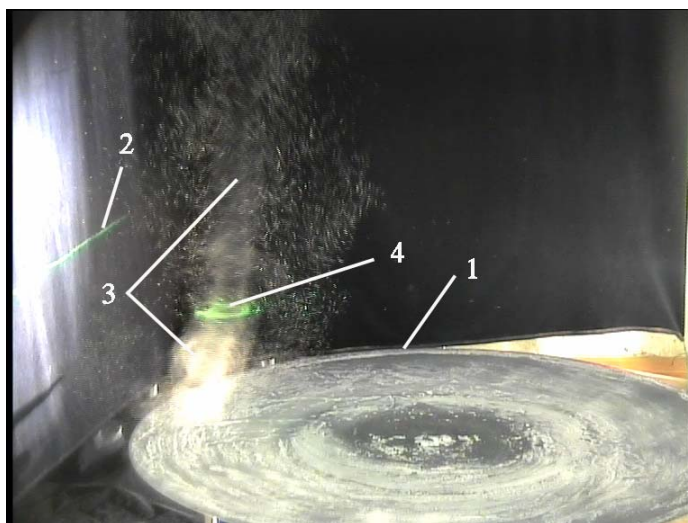


б)

Рис. 5. 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)

На рис. 5а показана основная стадия существования смерча, которая является самой продолжительной и приносящей максимальные разрушения. Во время этой стадии воронка может менять свои очертания, сохраняя при этом столбообразную форму. 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 (рис. 4б) и последующем обрыве. На рис. 5б, в качестве сравнения, 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.

На рис. 6 приведен типичный кадр видеозаписи эксперимента по визуализации поперечного сечения воронки вихря, при работе на тепловом режиме № 6. В данном случае, визуализация осуществлялась с помощью частиц магнезии. 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.

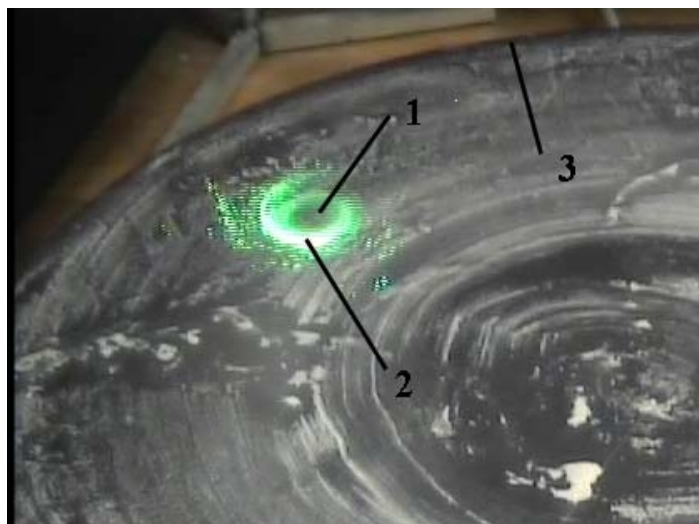


1 – край подстилающей поверхности; 2 – след лазерного ножа на стене; 3 – воздушный вихрь; 4 – сечение вихря лазерным ножом («глаз вихря»)

Рис. 6. Эксперимент по визуализации поперечного сечения воронки вихря (расстояние от лазерного ножа до поверхности равно 300 мм)

На рис. 7 показан увеличенный фрагмент типичного кадра видеозаписи по визуализации воронки вихря, по которому можно сделать вывод о спиральном строении воронки вихря, что является убедительным свидетельством сходства его гидродинамической структуры со строением ураганов.

Многочисленные повторения экспериментов позволили сделать следующие заключения о геометрии воронки вихрей и их динамике. Максимальный диаметр воронки вихря достигал 6 – 10 см при толщине стенок 2 – 3 см. 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.



1 – внутренняя полость вихря («глаз вихря»); 2 – стенка вихря; 3 – край подстилающей поверхности.

Размер изображения – 500×370 мм

Рис. 7. Типичный кадр с изображением поперечного сечения воронки вихря (расстояние от лазерного ножа до поверхности равно 100 мм)

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЕЙ СКОРОСТЕЙ

Измерение мгновенных полей скорости свободных концентрированных вихрей производились в поперечной плоскости, параллельной поверхности нагрева. Метод заключался в измерении перемещения частиц-трассеров (частицы магнезии либо дым-жидкости), находящихся в плоскости сечения, за определенный интервал времени. Частицы в измерительной области освещались при помощи создаваемого лазером светового ножа. Двойной импульсный Nd-YaG-лазер генерировал два последовательных импульса с заданной задержкой по времени (от 600 до 800 мкс). Мощность импульса варьировалась в пределах 6 – 8 МВт, длительность импульса не более 5 нс. Образы частиц фиксировались на две цифровые фотокамеры 4 МРiх, имеющие формат изображения 2048×2048. Камеры располагались таким образом, что их оптические оси были перпендикулярны поверхности нагрева и параллельны друг другу. Синхронизация лазера и фотоаппаратуры осуществлялась с помощью синхронизирующего процессора, осуществляющего отсчет временных интервалов и генерацию синхроимпульсов через заданные промежутки времени. Последующая обработка изображений производилась на ПК с помощью программного обеспечения ActualFlow. Последнее позволило рассчитать смещение частиц за время между вспышками источника света и построить двухкомпонентное поле скоростей в поперечном сечении вихря.

Перед проведением эксперимента проводилась калибровка резкости камер на плоскость поперечного сечения, в котором предполагалось вести съемку. В результате калибровки определялся масштабный коэффициент, по которому осуществлялся пересчет величины смещения частиц в пикселях в реальные размеры измеряемой области.



В результате проведения многократных измерений были измерены поля скоростей концентрированных вихрей в поперечных сечениях на высотах от 100 до 250 мм над подстилающей поверхностью. Типичная картина полей скорости, полученных на частицах магнезии (режим № 6) приведена на рис. 8. Набранная статистика позволила построить характерное распределение азимутальной скорости по радиусу вихря и провести прямую аналогию получаемых вихрей с модельным вихрем Рэнкина.

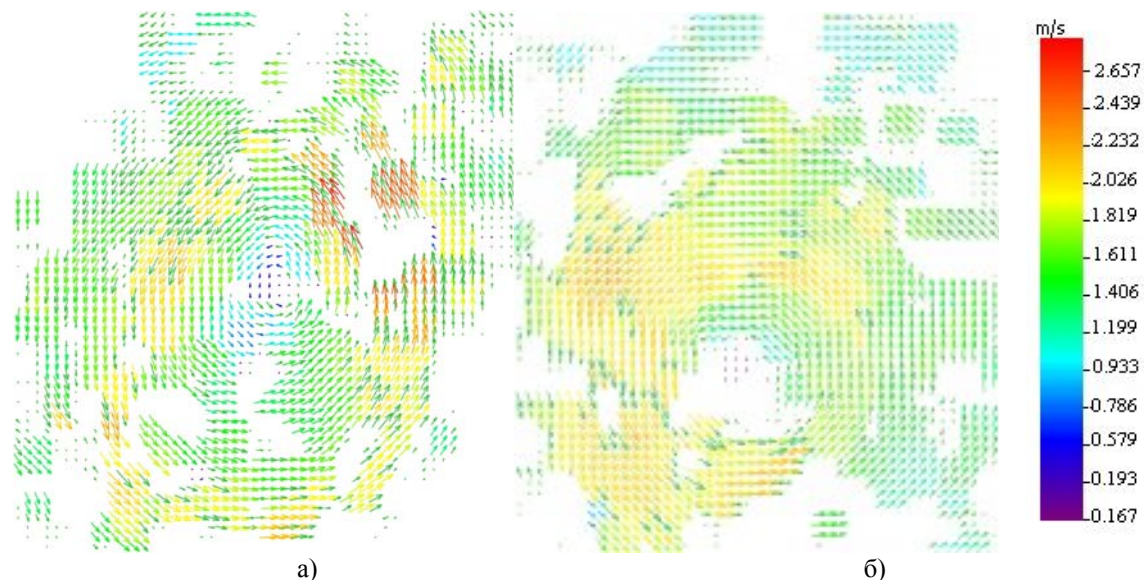


Рис. 8. Типичные поля скоростей в поперечного сечения воронки вихря (расстояние от лазерного ножа до поверхности равно 200 мм) в моменты времени после зарождения вихря  $t$ : а) – 0,8 с; б) – 1,6 с

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью видеосъемки совместно с визуализацией посредством частиц магнезии и дымовых частиц проведен качественный анализ динамики свободных концентрированных вихрей, возникающих над нагреваемой подстилающей поверхностью вследствие неустойчивой стратификации воздуха. Проведена аналогия получаемых вихревых образований с реально существующими в природе. Выявлены различные типы траекторий перемещения основания вихревых структур.

Работа выполнена при поддержке Программ фундаментальных исследований ОЭММПУ РАН «Фундаментальные проблемы горения и детонации в энергоустановках» и «Физико-химическая механика неравновесных систем», а также Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 11-08-00591).

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$T_a$  — температура воздуха над подстилающей поверхностью, К;

$T_c$  — температура в центре подстилающей поверхности, К;

$\tau_h$  — время нагрева подстилающей поверхности, с;

$\tau_c$  — время охлаждения подстилающей поверхности, с;

$h$  — характерная высота над подстилающей поверхностью, м;

$\beta$  — коэффициенты объемного расширения,  $K^{-1}$ ;

$\nu$  — коэффициент кинематической вязкости,  $m^2/s$ ;

$a$  — температуропроводность,  $m^2/s$ ;

$g$  — ускорение свободного падения,  $m/s^2$ .

## 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. **Atlantic** hurricane season of 2004 /Franklin J.L., Pasch R.J., Avila L.A. et al.// *Monthly weather review*. 2006. V. 134. P.981.
3. **Atlantic** hurricane season of 2005 / Beven II J.L., Avila L.A., Blake E.S. et al. // *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. **Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н., Таекин С.И.** О возможности физического моделирования воздушных смерчей в лабораторных условиях // *ТВТ*. 2008. № 6. С. 957.
6. **Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Таекин С.И., Копейцев В.Н.** Генерация свободных концентрированных воздушных вихрей в лабораторных условиях // *ТВТ*. 2009. № 1. С. 84.
7. **Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н.** К вопросу управления поведением воздушных смерчей // *ТВТ*. 2009. № 6. С. 870.
8. **Наливкин Д.В.** Ураганы, бури и смерчи. Географические особенности и геологическая деятельность. Л.: Наука, 1969. 487 с.

M.A. Gorbachev, A.Y. Varaksin, M.E. Romash, V.N. Kopeitsev

*Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Russia,  
125412, Moscow, Izhorskaya 13 (build.2), E-mail: varaksin\_a@mail.ru*

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FREE CONCENTRATED VORTEX STRUCTURE

*The description of experimental plant for a generation of free concentrated thermal vortices has been presented. Heat rates have been revealed also spatio-temporal field of temperatures due to unstable stratification results in appearance of free vortices has been measured. The possibility of investigation of free concentrated vortices dynamics with usage of video filming and different visualization methods has been demonstrated. Problems of formation and extension of inner cavity of free air vortices have been investigated. Transient velocity fields in cross-section of free vortex structure have been found.*

VORTEX FLOW, TORNADO-LIKE FLOWS, PHYSICAL SIMULATION