

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*

## **МЕТОД ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СВОБОДНЫЕ НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ВИХРИ**

### **АННОТАЦИЯ**

В докладе описан метод воздействия на воздушные вихревые структуры малых масштабов, заключающийся в расположении на пути их распространения препятствий в виде вертикальных или горизонтальных сеток. Использование плоского светового ножа совместно с визуализацией посредством частиц магнезии позволило изучить процесс взаимодействия воздушных вихрей с сеточными препятствиями. Описаны некоторые физические основы возможного влияния сеточных препятствий на поведение свободных нестационарных вихрей.

### **ВИХРЕВЫЕ ПОТОКИ, ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Вихревое движение является одной из самых распространенных форм движения воздуха. Вихревые течения повсеместно можно наблюдать в природе; они находят свое применение во многих технических устройствах [1–3].

Каждый год атмосферные вихри различных масштабов (ураганы, торнадо) приводят к гибели людей и наносят огромный материальный ущерб [4–6]. К настоящему времени эффективные методы борьбы со стихией отсутствуют. Вследствие этого экспериментальное изучение вопросов генерации, устойчивости и управления характеристиками свободных нестационарных воздушных вихрей, близких по своей структуре к атмосферным вихревым образованиям, является актуальной задачей.

Ограниченные стенками стационарные вихревые течения формируют посредством использования вентиляторов, механических закручивающих устройств (направляющих закручивающих лопаток, винтов, шнеков, внутреннего спирального оребрения и т.п.), а также путем тангенциального соплового подвода среды и интенсивного вращения корпусных элементов установок [7–13]. При такой постановке целый ряд принципиальных фундаментальных задач изучения вихрей оставался вне рассмотрения. Среди них – вопрос генерации вихрей, изучение их устойчивости и возможности управления.

Настоящая работа является продолжением исследований авторов [14–19], в которых впервые была продемонстрирована принципиальная возможность генерации свободных нестационарных воздушных вихрей в лабораторных условиях путем создания неустойчивой стратификации воздуха вследствие нагрева подстилающей поверхности. В работе [15] были исследованы тепловые режимы нагрева (охлаждения) подстилающей поверхности, при которых происходит образование вихрей, а также проведены оценки их интегральных

параметров (геометрические размеры, время жизни, скорость перемещения и др.) с использованием видеосъемки. В [16] получены пространственно-временные поля температур воздуха и определен диапазон чисел Рэлея, при которых происходит образование свободных вихрей различной интенсивности. В работах [17-19] показана эффективность различных способов визуализации свободных нестационарных вихрей, изучены вопросы формирования и развития воронки вихрей, а также произведена оценка важных для моделирования воздушных смерчей безразмерных критериев (параметр закрутки, число Россби).

Предложенный метод воздействия на вихревые образования типа воздушных вихрей, заключается в расположении на их пути препятствий в виде вертикальных и горизонтальных сеток различной геометрии. Предполагается, что данный метод может являться достаточно эффективным средством управления характеристиками вихря, приводя к его разрушению (распаду), ослаблению и (или) изменению пути распространения. Цель данной работы – анализ физических основ (механизмов) воздействия сеточных препятствий на нестационарные вихри, физическое моделирование влияния вертикальных сеток разной геометрии на модельные вихревые структуры различной интенсивности, а также попытка экстраполяции полученных результатов на вихри больших масштабов.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА**

Подробное описание используемой экспериментальной установки, параметров тепловых режимов, а также последовательности проведения экспериментов дано в работе [15]. 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.

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.

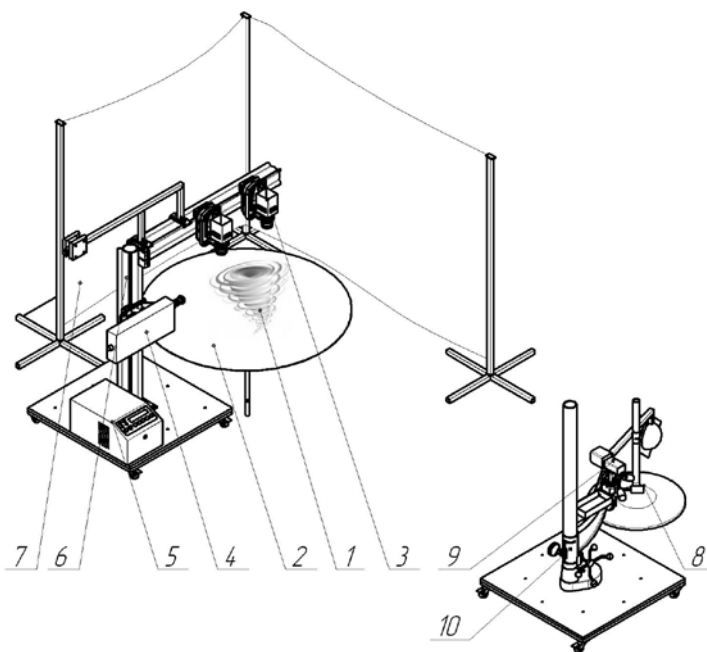


Рис. 1. Схема эксперимента по визуализации воздушных вихрей: 1 – свободный концентрированный вихрь; 2 – подстилающая поверхность; 3 – цифровая фотокамера; 4 – лазер; 5 – блок синхронизации; 6 – рама; 7 – фоновое полотно; 8 – стойка освещения; 9 – цифровая видеокамера; 10 – штатив

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 вихревых структур использовались частицы-трассеры (частицы магнезии микрометровых размеров), которые наносились тонким слоем на подстилающую поверхность перед проведением эксперимента.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВИХРЕЙ С ВЕРТИКАЛЬНЫМИ СЕТКАМИ

В ходе подготовки к экспериментам были апробированы 3 варианта расположения вертикальных сеток на подстилающей поверхности:

- 1) по окружности определенного радиуса;
- 2) по некоторому сегменту определенного радиуса;
- 3) по прямой, проходящей через всю подстилающую поверхность на некотором расстоянии от ее центра.

подавляющее большинство экспериментов было проведено с использованием третьего варианта расположения сеток. Сетки длиной 900 мм располагались одиночно на расстоянии 320 мм от центра подстилающей поверхности либо в паре параллельно друг другу на расстоянии 300 мм от центра с интервалом в 100 мм. В таблице 1 приведены основные параметры стальных сеток, использованных в качестве препятствий при проведении экспериментов.

Таблица 1. Основные параметры сеток

№ п/п	Высота сетки, мм	Размер ячейки (по вертикали), мм
1	60	12
2	60	40
3	150	12
4	150	40
5	60	0,42

Все приводимые ниже выводы относятся к тепловому режиму №6 [15]. На этом режиме происходила генерация наиболее крупных и долгоживущих вихрей. При изучении влияния сеток на динамику свободных вихрей к статистической обработке принимались только те вихревые образования, которые удовлетворяли следующим требованиям:

- 1) их генерация осуществлялась в той половине листа, где была установлена сетка;
- 2) движение основания вихря осуществлялось в направлении сетки;
- 3) время жизни вихря и его видимая высота составляли не менее 3 с и 0,2 м соответственно.

В результате проведенных исследований было выявлено шесть основных вариантов поведения вихрей:

- 1) отчетливое перемещение вихря к сетке и его распад вблизи сетки без ее пересечения;
- 2) движение вихря к сетке, его замедление (вплоть до полной остановки) при приближении к ней и последующий распад;
- 3) перемещение вихря к сетке с последующим изменением направления, движением вдоль сетки (без ее пересечения) и последующим распадом;
- 4) движение вихря к сетке и его отчетливый распад при ее пересечении;
- 5) перемещение вихря к сетке, его распад на сетке с повторным зарождением вихря после сетки;
- 6) движение вихря к сетке и ее пересечение, сопровождающееся изменением направления и характеристик (его ослабление).

Сказанное выше позволяет сделать вывод о том, что использование сеточных ограждений решает (в той или иной степени) задачу управления характеристиками свободного вихря, приводя к изменению пути его распространения (варианты 2,3 и 6), ослаблению (вариант 6) и распаду (варианты 1-5), правда с некоторой вероятностью повторного зарождения (вариант 5).

Статистическая обработка полученных в ходе экспериментов видеозаписей позволила определить вероятность реализации различных вариантов взаимодействия вихря с препятствием в виде сетки. Для высокой сетки с мелкими ячейками (сетка №3) были получены следующие значения вероятностей: вариант 1 – 12%, вариант 2 – 8%, вариант 3 – 14%, вариант 4 – 52%, вариант 5 – 8%, вариант 6 – 6%.

Увеличение размера ячейки сетки и уменьшение ее высоты приводили к росту вероятности пересечения сетки вихрем (варианты 5 и 6) и вероятности последующего зарождения после сетки (вариант 5).

Ниже рассмотрим типичный пример изучения поведения взаимодействия вихря с двумя вертикальными сетками. В данном случае в качестве препятствия использовались две вертикальные металлические сетки (рис. 2), которые располагались параллельно друг другу (расстояние между сетками 100 мм). Ближайшая к центру подстилающей поверхности сетка 1 находилась на расстоянии 300 мм от него.

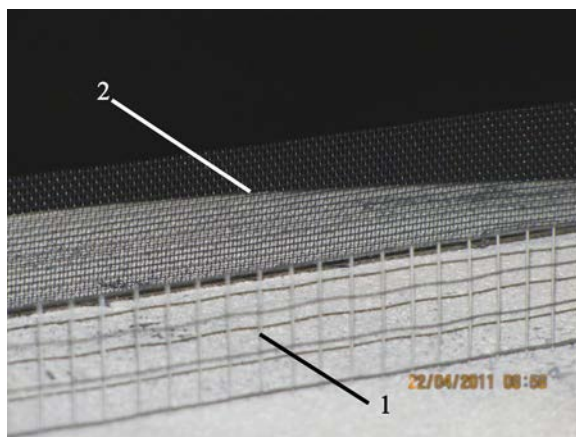
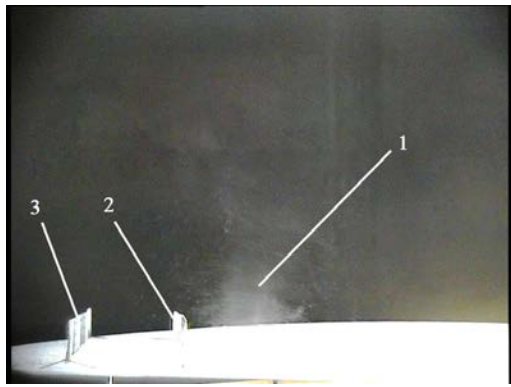


Рис. 2. Фотография двух металлических сеток, установленных на подстилающей поверхности. 1 – сетка №1, 2 – сетка №2 (см. таблицу 1)

Выборочные кадры видеосъемки взаимодействия вихря с двумя вертикальными сетками приведены на рис. 3. Каждый из кадров соответствует определенному моменту времени, отсчитываемому от зарождения вихревой структуры (начала уноса частиц с подстилающей поверхности). Проведем качественный анализ влияния двух препятствий на динамику вихря. На первых двух фотографиях (рис. 3а и 3б) хорошо видно движение вихревой структуры справа налево и приближение ее к первой из вертикальных сеток. На рис. 3в вихрь начинает пересекать первую сетку с некоторым притормаживанием (многократно наблюдаемый в экспериментах эффект, к сожалению, не так отчетливо различимый в силу малого количества приводимых кадров). На следующем кадре (рис. 3г) видно, что центр основания вихревой структуры (впрочем, как и вся нижняя часть воронки вихря) располагается между двумя сетками. Уширение и размытие воронки вихря свидетельствуют в пользу его ослабления (снижение вертикальной составляющей скорости воздуха в воронке). Рисунок 3д показывает, что вихревая структура распадается вследствие еще большего размытия, прекращения вихревого движения воздуха и отсутствия подхвата частиц с подстилающей поверхности. На следующем рисунке (рис. 3е) виден подхват (теперь уже между двух сеток) новой порции частиц магнезии с поверхности. Правда, вскоре происходит его ослабление (рис. 3ж) и распад (рис. 3з).



(а)



(д)



(б)



(е)



(в)



(ж)



(г)



(з)

Рис. 3. Фотографии вихря при его последовательном взаимодействии с двумя вертикальными сетками в разные моменты времени (режим №6, размер изображения: 600x470 мм); время от момента зарождения: (а) – 1,70 с, (б) – 1,86 с, (в) – 2,14 с, (г) – 2,42 с, (д) – 2,50 с, (е) – 2,70 с, (ж) – 2,98 с, (з) – 3,26 с. Цифрами обозначены: 1 – вихрь, 2 – сетка №1, 3 – сетка №2

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕТОК

В результате статистической обработки результатов более чем 100 экспериментов были получены следующие вероятности реализации разных вариантов взаимодействия вихрей с очень мелкой вертикальной сеткой (сетка №5): вариант 1 – 14%, вариант 2 – 44%, вариант 3 – 24%, вариант 4 – 12%, вариант 5 – 4%, вариант 6 – 2%. Для высокой сетки с мелкими ячейками (сетка №3): вариант 1 – 12%, вариант 2 – 8%, вариант 3 – 14%, вариант 4 – 52%, вариант 5 – 8%, вариант 6 – 6%.

Обработка аналогичного объема экспериментальных данных по взаимодействию вихревых структур с горизонтальной сеткой (сетка №1), расположенной на расстоянии 25 мм от подстилающей поверхности, привела к следующим результатам: вариант 1 – 4%, вариант 2 – 3%, вариант 3 – 0, вариант 4 – 14%, вариант 5 – 35%, вариант 6 – 44%.

Что касается горизонтальной сетки, расположенной непосредственно на подстилающей поверхности, то она продемонстрировала большую (по сравнению с установленной на расстоянии 25 мм от поверхности сетки) эффективность воздействия на вихревые структуры. По-видимому, этот эффект связан с увеличением потерь вихря на трение о макронеровности подстилающей поверхности, создаваемые лежащей на ней сеткой. В целом, горизонтальные сетки показали меньшую эффективность по сравнению с вертикальными.

Выше было перечислено несколько вероятных механизмов воздействия препятствия в виде сетки на структуру вихря, основными из которых являются:

- 1) взаимодействие генерируемой за сеткой мелкомасштабной турбулентности с крупномасштабной турбулентной структурой вихревой структуры, приводящее к нарушению ее симметрии;
- 2) акустическое влияние колебаний, идущих от сетки навстречу приближающемуся вихрю.

Генерация мелкомасштабной турбулентности в случае установки горизонтальной сетки на некотором расстоянии от подстилающей поверхности происходит только при прохождении вихря непосредственно над сеткой. Вероятно, именно с этим обстоятельством связан многократно наблюдаемый в экспериментах факт отсутствия торможения вихря при его сближении с горизонтальной сеткой. Нарушение симметрии вихря происходит только при достижении «стенкой вихря» сетки, а также при его «сходе» с горизонтальной сетки.

Распространение малых (слабых) волн давления, идущих от сетки, навстречу приближающейся вихревой структуре в случае горизонтальной сетки практически не происходит, так как проекцией сетки на вертикальную плоскость (фронт распространения вихря) является прямая линия. Поэтому действие и этого физического механизма также невелико.

## ОБОБЩЕНИЕ ДАННЫХ

Анализ полученных результатов по взаимодействию модельных вихрей с вертикальными сетками различной геометрии позволил предложить следующий комплексный размерный параметр, учитывающий геометрию сетки, в виде

$$G = \frac{hd}{a}. \quad (1)$$

где  $h$  – высота сетки, используемой в экспериментах;  $d$  – диаметр проволоки сетки;  $a$  – размер ячейки. В экспериментах использовались восемь сеток с различными значениями геометрического параметра –  $G = 0,0005 - 0,01$  м. Сетка с самым малым значением геометрического параметра имела  $h = 0,01$  м,  $d = 10^{-4}$  м и  $a = 2 \cdot 10^{-3}$  м, а сетка с самым большим параметром –  $h = 0,06$  м,  $d = 2 \cdot 10^{-3}$  м и  $a = 1,2 \cdot 10^{-2}$  м.

Энергия генерируемых в лаборатории вихрей (на единицу высоты) определялась с использованием соотношения

$$E = \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{U_{zm}^2}{2}. \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха;  $D$  – диаметр воронки вихря;  $U_{zm}$  – среднее интегральное значение вертикальной составляющей скорости в воронке вихря.

Использование полевого измерителя скоростей «ПОЛИС» (ИТ СО РАН) позволило провести измерения полей скорости и определить энергию модельных вихрей, а также ее изменение по времени. Как показали специальные тестовые измерения, средняя интегральная вертикальная составляющая скорости близка к соответствующей азимутальной составляющей, т.е.  $U_{zm} \approx U_{\varphi m}$ . При этом допущении погрешность определения энергии вихря находилась в пределах 50%. Среднее интегральное значение азимутальной составляющей скорости определяется как:

$$U_{\varphi m} = \frac{1}{R} \int_0^R U_{\varphi}(r) dr. \quad (3)$$

где  $r$  – расстояние от центра вихря;  $R$  – условный радиус воронки вихря (расстояние от центра вихря, на котором значение скорости равно половине максимальной скорости,  $U_{\varphi} = U_{\varphi \max} / 2$ );  $U_{\varphi}(r)$  – распределение азимутальной скорости в поперечном сечении воронки вихря. Пример такого распределения для вихрей, получаемых на режиме №6, показан на рис. 4.

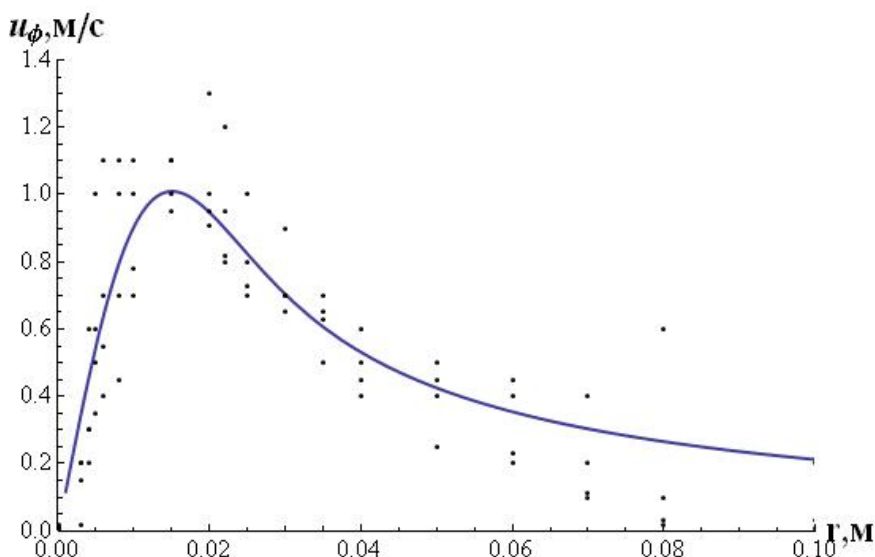


Рис. 4. Распределение азимутальной скорости в поперечном сечении воронки вихря (расстояние от лазерного ножа до поверхности равно 200 мм, режим №6)

При обработке данных величина энергии разрушенного вихря (на единицу высоты) бралась как среднее интегральное значение за время его жизни.

$$E = \frac{1}{\tau_{\max}} \int_0^{\tau_{\max}} E(\tau) d\tau. \quad (4)$$



где  $\tau$  – время;  $\tau = \tau_{\max}$  – время жизни вихря;  $E(\tau)$  – зависимость энергии вихря от времени.

Полученные экспериментальные данные по энергии модельных вихрей, разрушаемых сеточными препятствиями различной геометрии, показаны на рис. 5. Из рис. 5 можно сделать следующие выводы:

- 1) между комплексным геометрическим параметром сетки и энергией разрушаемых свободных вихрей имеется однозначная связь;
- 2) рост геометрического параметра приводит к росту энергии разрушаемых вихрей;
- 3) экстраполяция результатов показывает, что сеточное заграждение с  $G \approx 1$  м может приводить к разрушению вихрей, имеющих энергию  $E \approx 50000$  Дж/м (это соответствует энергии торнадо категории F1, имеющему воронку диаметром 10 м).

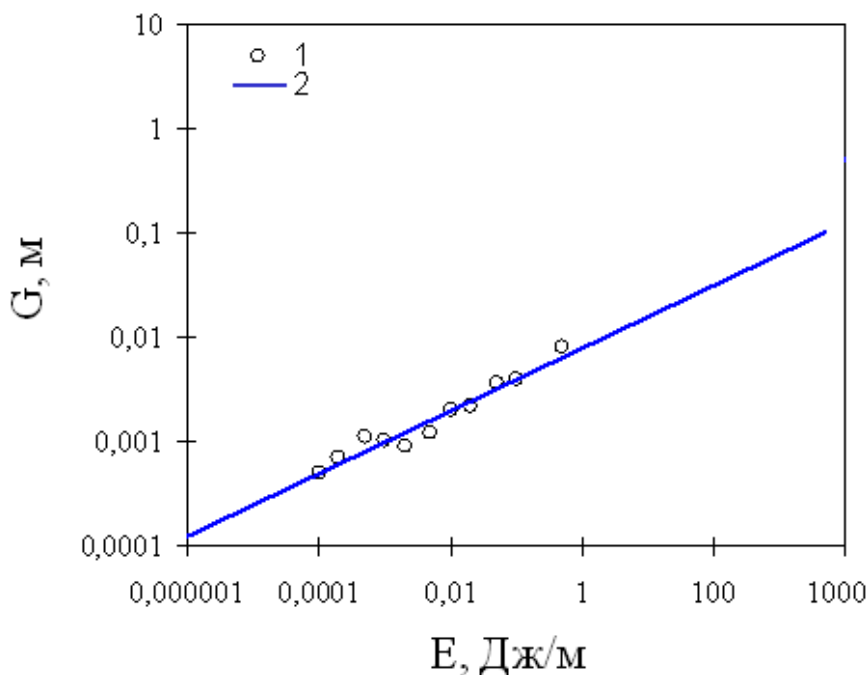


Рис. 5. Влияние комплексного геометрического параметра сеточного заграждения на энергию разрушаемых модельных вихрей: 1 – экспериментальные данные; 2 – экстраполяция экспериментальных данных на вихри больших масштабов

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Видео- и фотосъемка позволили осуществить визуализацию (с использованием частиц-трассеров) возникающих над подстилающей поверхностью свободных нестационарных концентрированных вихревых структур, а также апробировать предлагаемый метод воздействия на их динамику. Проведено обобщение результатов взаимодействия модельных нестационарных воздушных вихрей различной интенсивности с одиночными вертикальными сеточными заграждениями разной геометрии. Предпринята попытка экстраполяции полученных результатов на вихри больших масштабов и интенсивности, имеющие место в атмосфере Земли.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 11-08-00591, № 12-08-90424-Укр\_а и № 12-08-90033-Бел\_а), Министерства образования и науки РФ (Государственный контракт № 2012-1.2.1-12-000-2007-059), а также Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Горение и взрыв».

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$h$  — высота сетки, м;

$d$  — диаметр проволоки, м;

$a$  — размер ячейки сетки, м;  
 $G$  — комплексный размерный параметр, м;  
 $D$  — диаметр воронки вихря, м;  
 $U_z$  — вертикальная компонента скорости, м/с;  
 $U_\varphi$  — азимутальная компонента скорости, м/с;  
 $\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\tau_{max}$  — время жизни вихря, с;  
 $E$  — энергия вихря, Дж/м.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вихревой эффект.** Эксперимент, теория, технические решения / Ш.А. Пиралишвили, В.М. Поляев, М.Н. Сергеев; Под ред. А.И. Леонтьева. М.: Издательство Энергомаш, 2000. 612 с.
2. **Гиневский А.С., Желанников А.И.** Вихревые следы самолетов. М.: Физматлит, 2008. 172 с.
3. **Управление** обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) / П.А. Баранов, С.В. Гувернюк, А.А. Ермишин и др.; Под ред. А.В. Ермишина, С.А. Исаева. М.: Издательство Московского университета, 2003. 360 с.
4. **Наливкин Д.В.** Ураганы, бури и смерчи. Географические особенности и геологическая деятельность. Л.: Наука, 1969. 487 с.
5. **Ashley W.S.** Spatial and temporal analysis of tornado fatalities in the United States: 1880-2005 // *Weather and forecasting*. 2007. V. 22. P. 1214.
6. **Franklin J.L., Pasch R.J., Avila L.A., Beven II J.L., Lawrence M.B., Stewart S.R., Blake E.S.** Atlantic hurricane season of 2004 // *Monthly weather review*. 2006. V. 134. P.981.
7. **Ying S.J., Chang C.C.** Exploratory model study of tornado-like vortex dynamics // *J. Atmospheric sciences*. 1970. V. 27. № 1. P. 3.
8. **Wan C.A., Chang C.C.** Measurement of the velocity field in a simulated tornado-like vortex using a three-dimensional velocity probe // *J. Atmospheric sciences*. 1972. V. 29. № 1. P. 116.
9. **Ward N.B.** The exploration of certain features of tornado dynamics using laboratory model // *J. atmospheric sciences*. 1972. V. 29. № 9. P. 1194.
10. **Leslie F.W.** Surface roughness effects on suction vortex formation: a laboratory simulation // *J. atmospheric sciences*. 1977. V. 34. № 7. P. 1022.
11. **Church C.R., Snow J.T., Agee E.M.** Tornado vortex simulation at Purdue university // *Bull. American meteorological society*. 1977. V. 58. № 9. P. 900.
12. **Baker G., Church C.R.** Measurements of core radii and peak velocities in modeled atmospheric vortices // *J. atmospheric sciences*. 1979. V. 36. P. 2413.
13. **Snow J.T., Church C.R., Barnhart B.J.** An investigation of the surface pressure fields beneath simulated tornado cyclones // *J. atmospheric sciences*. 1980. V. 37. P. 1013.
14. **Горбачев М.А., Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н.** Экспериментальное исследование структуры свободных концентрированных вихрей // *Оптические методы исследования потоков: Тез.докл. 11-й Межд. конф.* М.: МЭИ, 2011. С. 252.
15. **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.
16. **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.
17. **Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н.** О возможностях визуализации при моделировании воздушных смерчей // *ТВТ*. 2010. Т. 48. № 4. С. 617.

18. **Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н., Горбачев М.А.** Моделирование свободных тепловых вихрей: генерация, устойчивость, управление // ТВТ. 2010. Т. 48. № 6. С. 965.

19. **Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н., Горбачев М.А.** Физическое моделирование воздушных смерчей: некоторые безразмерные параметры // ТВТ. 2011. Т. 49. № 2. С. 317.

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*

## **METHOD OF INFLUENCE ON NONSTATIONARY THERMAL VORTICES**

*Method of influence on air vortices of small sizes is described in report. This method consists in the distribution of horizontal or vertical nets in the path of the vortex structure. Usage of the flat laser beam with visualization of flow by particles of magnesia allowed to study interaction of vortices with nets. Some probable physical effects of influence nets on propagation of nonstationary vortices are described.*

**VORTEX FLOW, PHYSICAL SIMULATION**