

**Российская академия наук
Объединенный институт высоких температур**

**СВОБОДНЫЕ
КОНЦЕНТРИРОВАННЫЕ
НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ВИХРИ:
ГЕНЕРАЦИЯ, УСТОЙЧИВОСТЬ,
УПРАВЛЕНИЕ**

Актуальность изучения однофазных, двухфазных и огненных вихрей

Концентрированные вихри оказывают значительное влияние на процессы теплообмена и горения, протекающие в тепловых двигателях и энергетических установках

В технике - вихревые горелки, центробежные форсунки, циклонные сепараторы, вихревые ячейки, различные турбулизаторы и т.п.

В природе - атмосферные циклоны (антициклоны), воздушные смерчи (торнадо), огненные смерчи при пожарах, «пыльные» дьяволы и т.д.

Ограниченные стенками вихревые течения формируют:

- 1) посредством тангенциального соплового подвода среды;
- 2) использования механических закручивающих устройств (направляющих закручивающих лопаток, винтов, шнеков, внутреннего спирального оребрения и т.п.);
- 3) интенсивного вращения корпусных элементов каналов (вращающихся труб, вращающихся подложек).

Вихревые структуры в природе

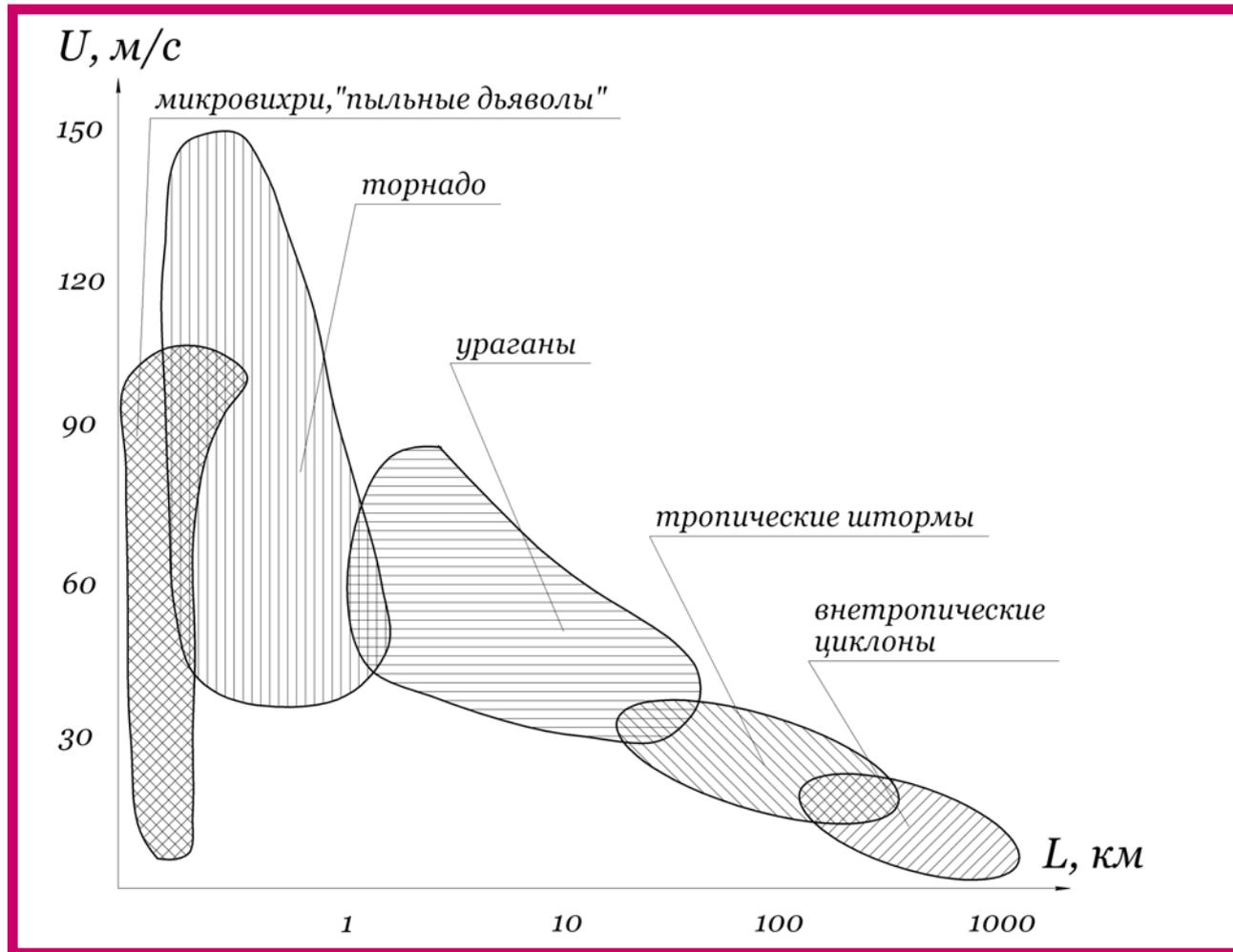


Рис. Разнообразие форм вихревого движения атмосферного воздуха в координатах «характерная скорость – пространственный масштаб».

Смерчи и ураганы (краткая справка)

Смерчи

Основная причина – неустойчивое состояние атмосферы (большие значения вертикальных градиентов температуры воздуха)

Стандартная атмосфера - $dT/dz=6$ град./1км

Сухоадиабатический градиент - $dT/dz=10$ град./1км

Самые сильные смерчи - dT/dz достигает сотен град.

Сезон торнадо – апрель, май (июнь); **Время суток** – 13-18 час.

Ураганы

Основная причина – неустойчивое состояние атмосферы (большие значения горизонтальных градиентов (контрастов) температуры)

Перепад тем-ры (полюс - экватор) - летом $dT=30$ град.
зимой $dT=60$ град.

Самые сильные ураганы - $dT/dx=12-16$ град./1000 км

Горизонтальный контраст тем-ры - разница осредненных температур в нижнем слое (9 км) тропосферы в двух сечениях, находящихся на расстоянии в 1000 км

Сезон ураганов – август, сентябрь, октябрь (ноябрь)

Места возникновения – 5-20 град. северной широты (оптимальное соотношение лучистого потока от Солнца и силы Кориолиса)

Вихри и смерчи в природе

Гладкий (узкий) смерч



«Дымовой дьявол»
во время травяного
пожара

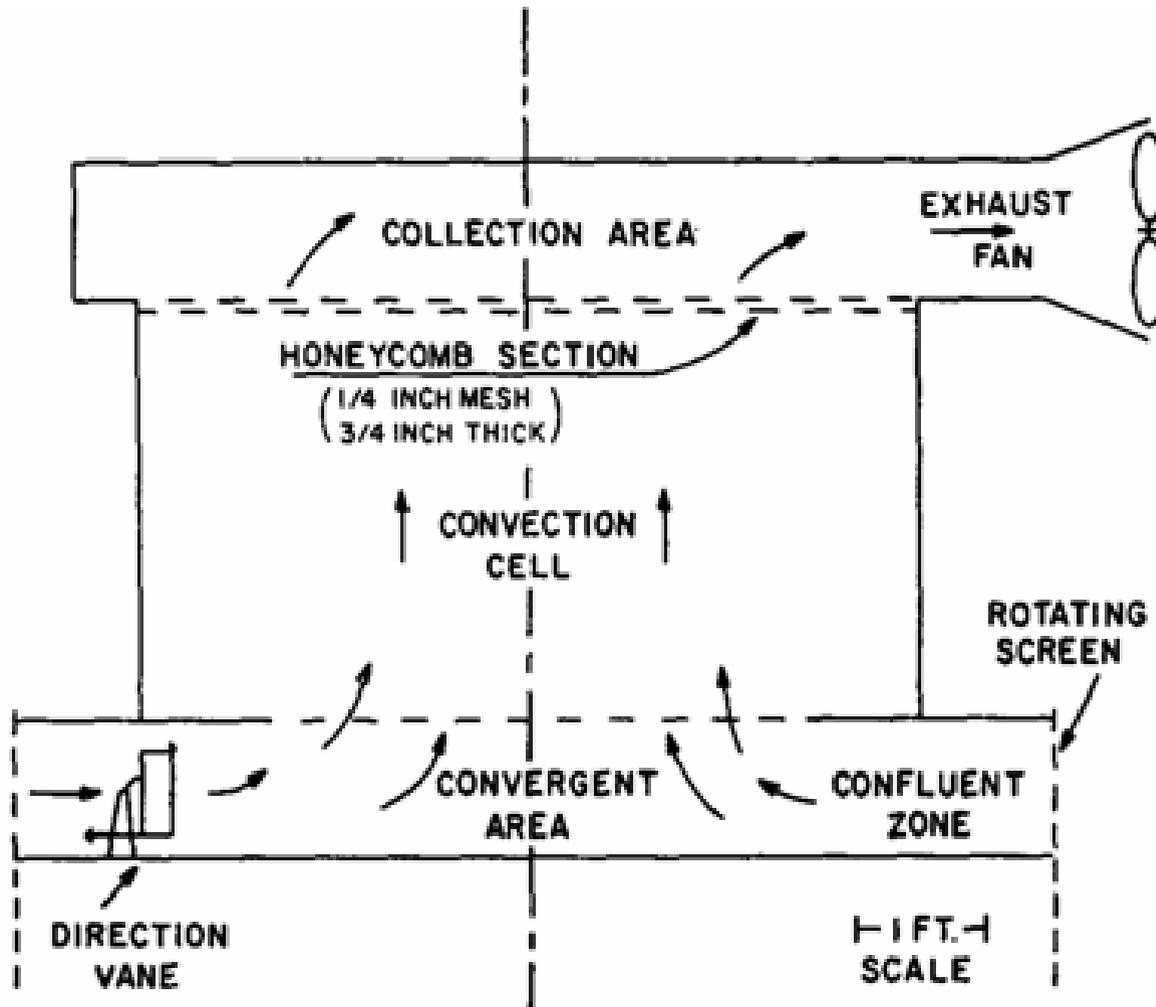


Расплывчатый (широкий)
смерч



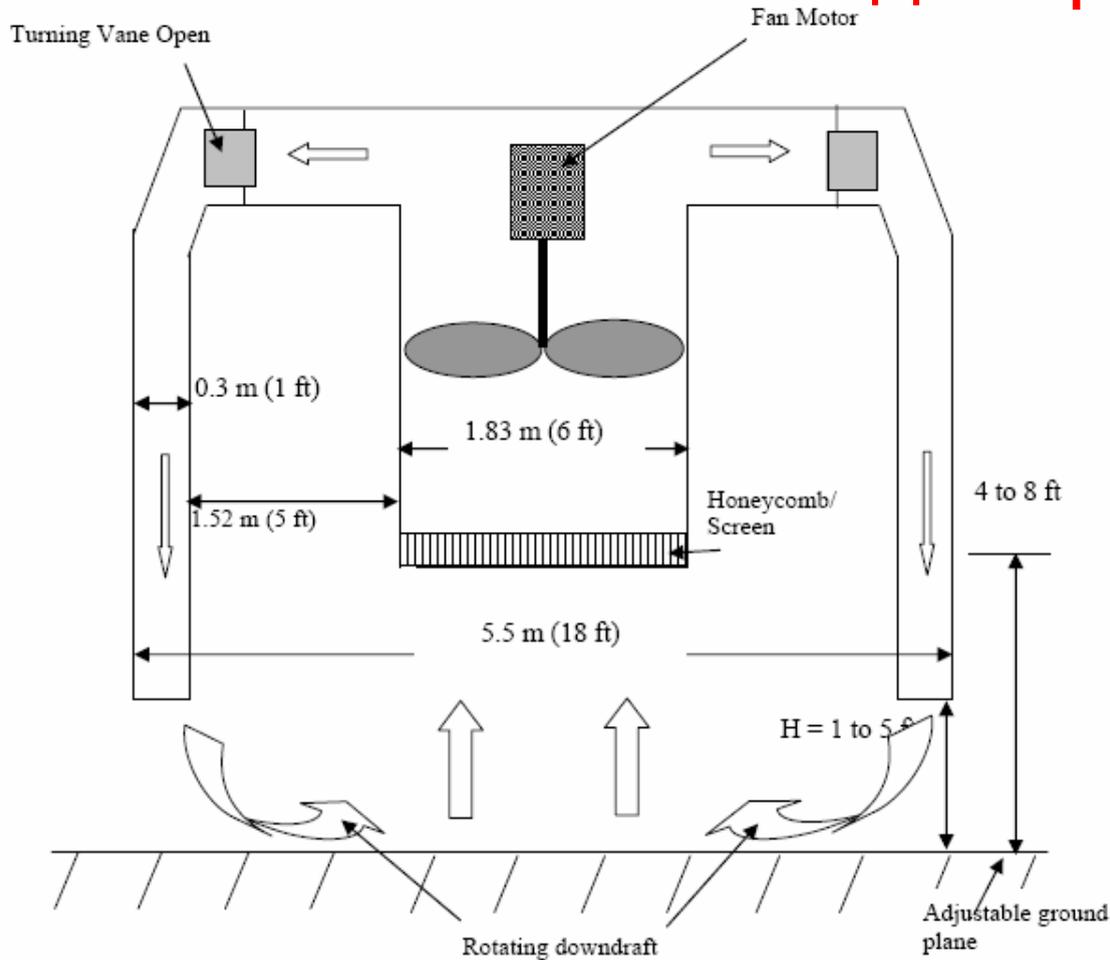
Огненный смерч

Физическое моделирование



Ward N. B. The exploration of certain features of tornado dynamics using laboratory model // J. Atmospheric Science. (1972)

Физическое моделирование



van F. L., Sarkar P.P., Gallus W.A. Design, construction and performance of a large tornado simulator for wind engineering applications // Engineering Structures (2008)

ывод: при осуществлении принудительной закрутки все ключевые проблемы (генерация, устойчивость, управление) остаются вне рассмотрения!

Изучение свободных вихрей (генерация)

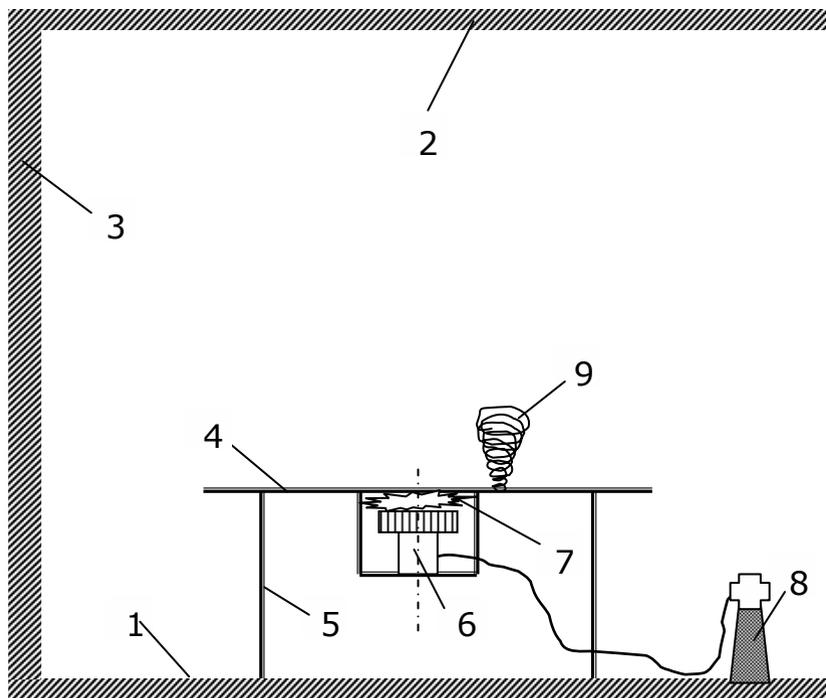


Схема экспериментальной установки: 1 – пол; 2 – потолок; 3 – одна из стен; 4 – стол (лист алюминия); 5 – ножка стола (3 шт.); 6 – газовая горелка; 7 – пламя; 8 – баллон с газом; 9 – вихревая структура.



Процесс нанесения на поверхность стола частиц магнезии.

Установка позволяет производить **контролируемый** нагрев подстилающей поверхности, приводящий к генерации вихрей вследствие неустойчивой стратификации воздуха (теплый воздух внизу – холодный воздух сверху).

Особенности (и задачи) изучения свободных вихрей

1. Спонтанность возникновения

→ Генерация

2. Пространственно-временная нестабильность

→ Устойчивость

3. Практическая невозможность влияния на характеристики

→ Управление

1. Генерация

(уровень температур подстилающей поверхности и воздуха, темп нагрева, градиенты температуры в горизонтальном и вертикальном направлениях и т.д.)

2. Устойчивость

(время жизни, кинематика вихря, динамика вихря и т.д.)

3. Управление

- Изменение геометрии подстилающей поверхности

(изменение шероховатости листа путем нанесения частиц, лунки, «оробрение» и т.д.)

- Изменение параметров неустойчивой стратификации воздуха

(изменение теплоотдачи от поверхности путем нанесения на поверхность частиц, локальное расхолаживание – «холодная долина» и т.д.)

- Воздействие на структуру вихря

(введение в вихревую структуру частиц и т.д.)

Тепловые режимы

№ п/п	Режим нагрева	Время нагрева τ_h , с	Время охлаждения τ_c , с	Макс. температура $T_{c \max}$, К
1	слабый	60	600	420
2		120	900	470
3		180	1200	500
4	сильный	60	600	500
5		120	900	580
6		180	1200	610

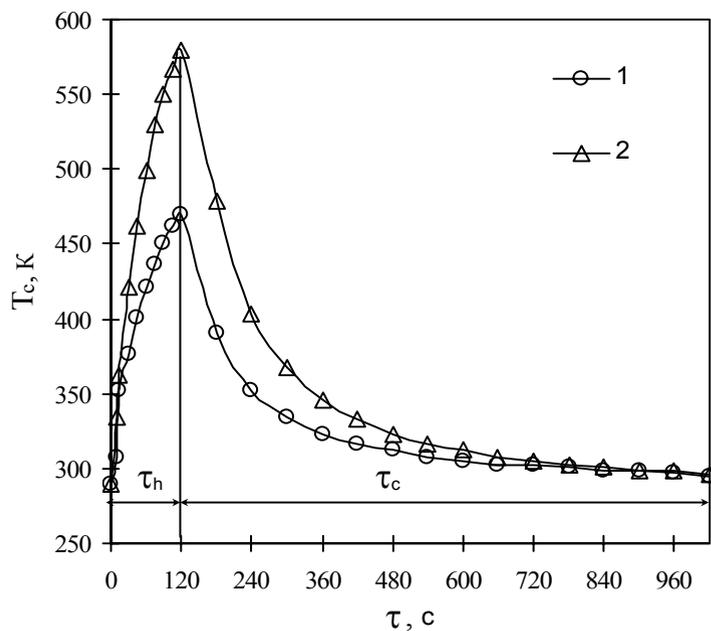


Рис. Зависимости температуры в центре подстиляющей поверхности от времени: 1 – режим №2; 2 – режим №5.

Распределение температуры подстиляющей поверхности

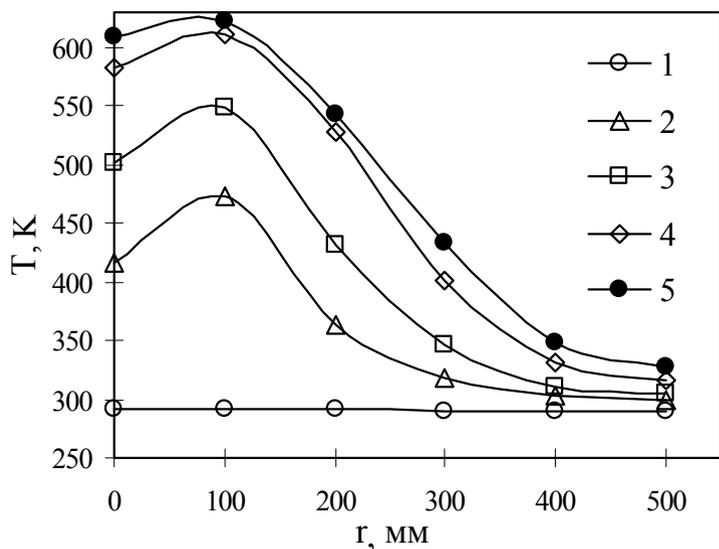


Рис. Зависимости температуры от радиуса подстиляющей поверхности и времени при нагреве (режим №6):

– 0; 2 – 30 с; 3 – 60 с; 4 – 120 с; 5 – 180 с.

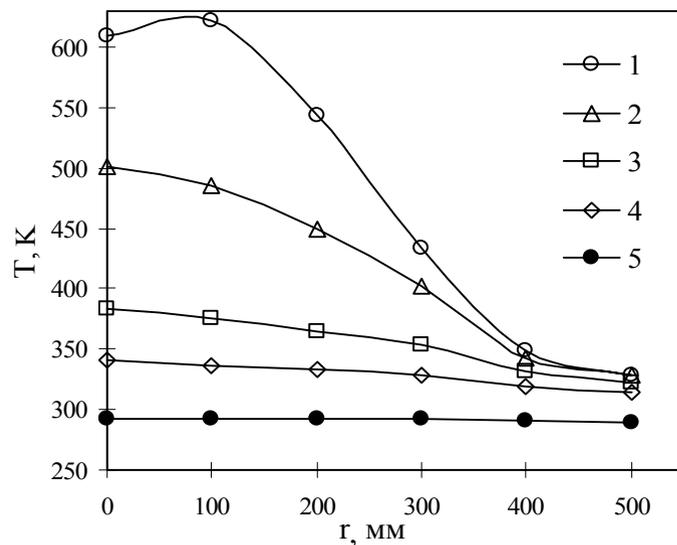


Рис. Зависимости температуры от радиуса подстиляющей поверхности и времени при охлаждении (режим №6):

1 – 0; 2 – 60 с; 3 – 180 с; 4 – 300 с; 5 – 1200 с.

с.

Максимальная температура подстиляющей поверхности 330°C

Распределение температуры воздуха

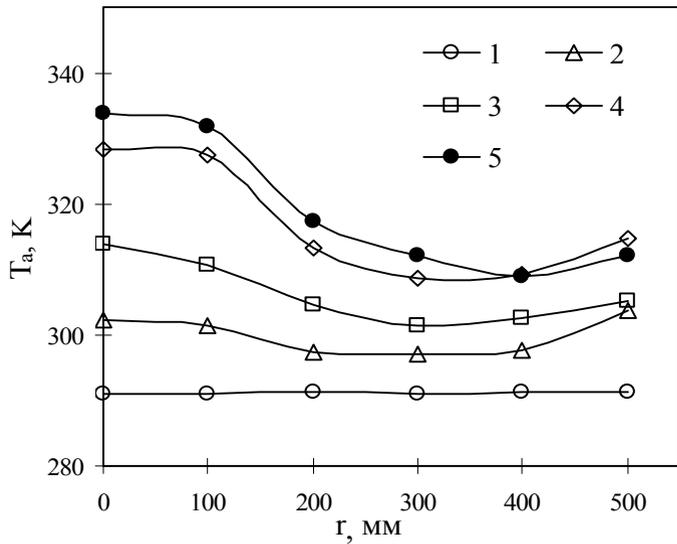


Рис. Зависимости температуры воздуха от радиуса подстилающей поверхности и времени при нагреве (режим №6) $y=50$ мм:
1 – 0; 2 – 30 с; 3 – 60 с; 4 – 120 с; 5 – 180 с.

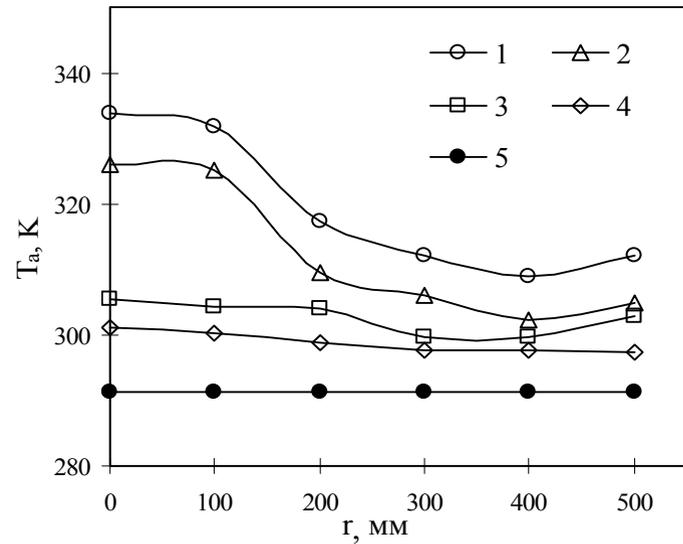


Рис. Зависимости температуры воздуха от радиуса подстилающей поверхности и времени при охлаждении (режим №6) $y=50$ мм:
1 – 0; 2 – 60 с; 3 – 180 с; 4 – 300 с; 5 – 1200 с.

Максимальная температура воздуха 60°C

Нестационарные свободные вихри (генерация)



Видимая высота вихря **1.5 м**, видимый диаметр вихря **0.1 м**, время жизни **35 с** (режим №6)

Информация о вихрях, получаемая путем покадрового анализа видеозаписей

- 1) область подстилающей поверхности, где происходит генерация вихрей;
- 2) направление вращения вихревой структуры;
- 3) количество наблюдаемых вихрей за один эксперимент;
- 4) траектория перемещения основания вихревой структуры;
- 5) длина траектории основания вихря;
- 6) скорость перемещения основания вихря;
- 7) время жизни (существования) вихревой структуры;
- 8) видимая высота вихрей;
- 9) видимый диаметр вихрей

и т.д.

Обобщение экспериментальных данных

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

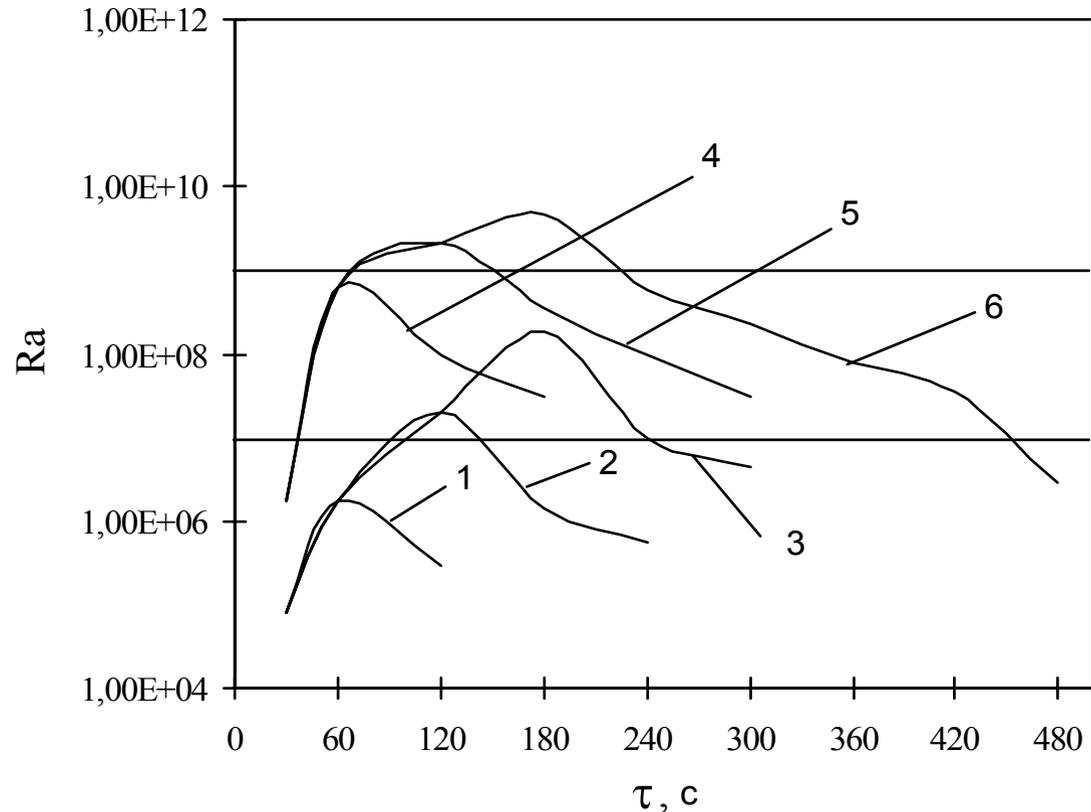


Рис. Зависимости числа Рэля от времени для различных тепловых режимов ($r=0$): 1 – режим №1; 2 – режим №2; 3 – режим №3; 4 – режим №4; 5 – режим №5; 6 – режим №6.

1. Крупные вихри

$$Ra > 10^9$$

2. Мелкие вихри

$$10^7 < Ra < 10^9$$

3. Вихри отсутствуют

$$Ra < 10^7$$

Изучение свободных воздушных вихрей



Физическое моделирование
(визуализация частицами магнезии)
негатив



Фотография воздушного смерча

Схема визуализации глаза вихря (лазерный нож)

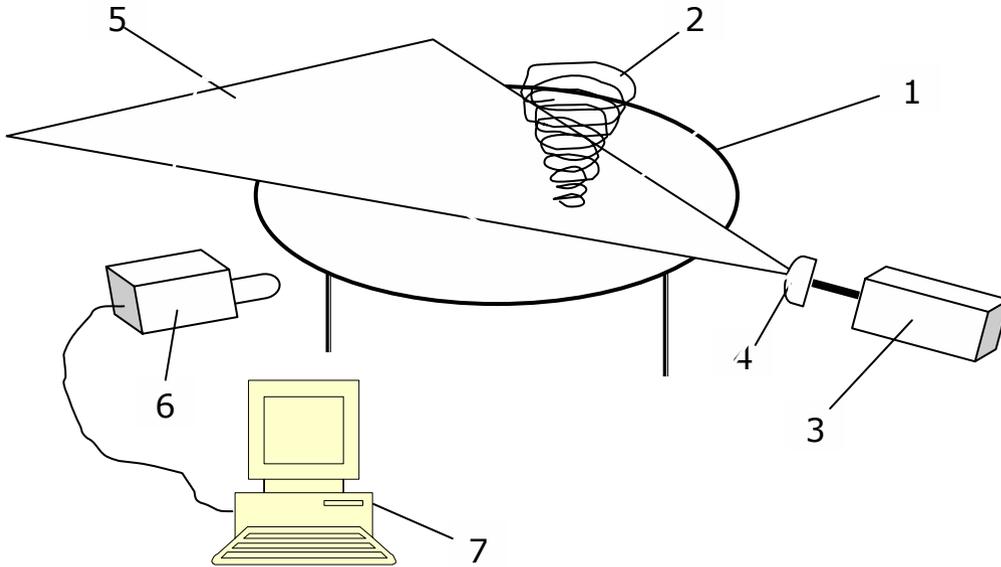
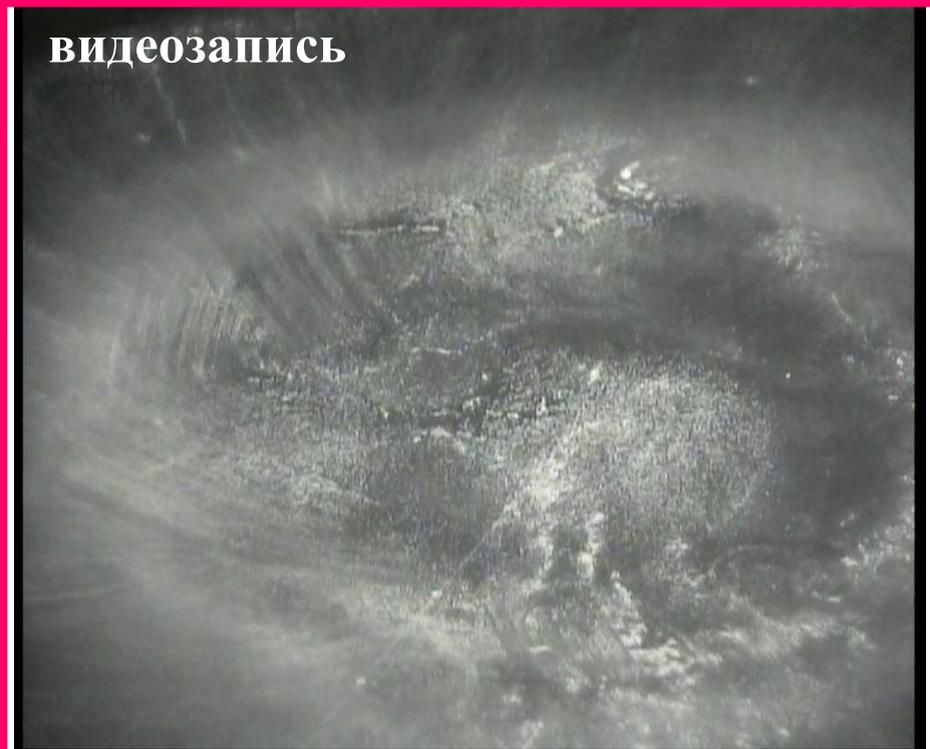


Схема эксперимента по визуализации воздушных вихрей: 1 – верхняя (подстилающая) поверхность стола (лист алюминия); 2 – нестационарный вихрь; 3 – лазер; 4 – оптическая насадка; 5 – лазерный нож; 6 – цифровая видеокамера; 7 – персональный компьютер.

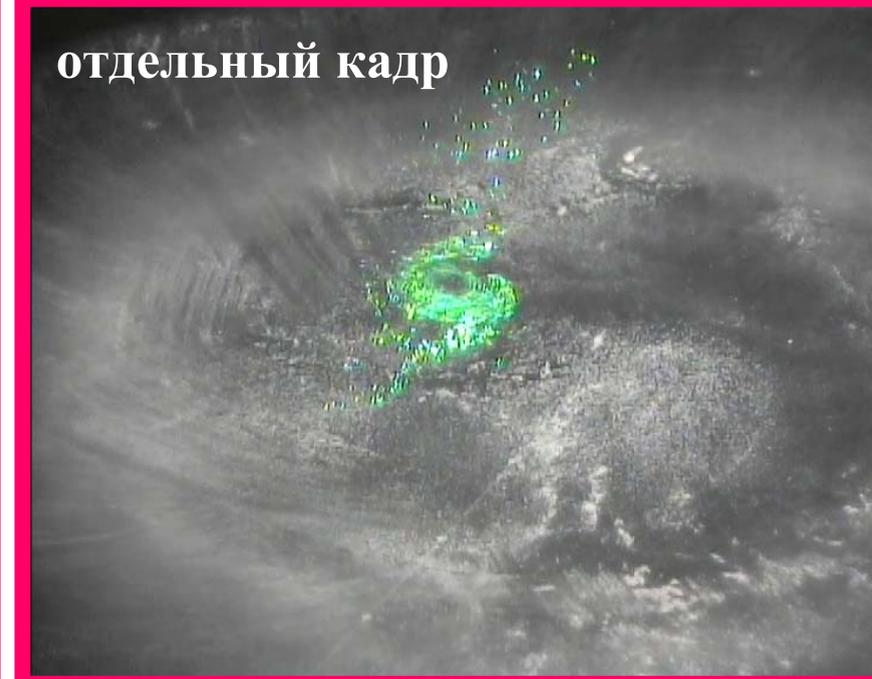
Эксперимент по визуализации воронки вихря лазерным ножом.

Визуализация глаза вихря (лазерный нож)

видеозапись



отдельный кадр



Вихрь был невидим для глаза человека вследствие малого количества частиц магнезии. Вихрь становится видимым! путем применения лазерного ножа.

Глаз вихря, стенка со спиралевидными ответвлениями... (гидродинамическая схожесть ураганами!).

«Дымовая» визуализация (видеозапись)



«Бабий торнадо»



«Хрустальная трубка» в облаках



«Пыльный смерч»



Визуализация вихревых трубок посредством пара легкокипящей жидкости (тепловые режимы №2, №3)



«паровые дьяволы»



«огненный смерч» во время лесного пожара в Подмоскowie

Изучение свободных вихрей (следы)



След вихревой структуры
(тип «КОЛЬЦО»)



След вихревой структуры
(тип «СПИРАЛЬ»)



След вихревой структуры
(тип «ЛИНИЯ»)

Микро-смерч как причина образования колец (кругов) на пшеничных полях



**След вихревой структуры
(тип «кольцо»)**

“Meanwhile, a team of physicists led by Dr Yuri Varaksin of the Moscow-based Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Sciences recently published results from experiments suggesting that vortices formed in unstable air can create the circles and swirls seen in crops.”

(Robert Matthews, The National, June 20, 2010 “Crop markings are still a puzzle in scientific circles”)

Источник: <http://www.thenational.ae>

Одним из самых загадочных явлений является феномен образования колец (кругов) на пшеничных полях. Известно, что кольца появляются преимущественно в ночное время, а значительное их количество наблюдается в Англии. Именно ночью складываются благоприятные условия для возникновения неустойчивой стратификации воздуха. Во-первых, вблизи прогретой за течение дня поверхности земли ночью формируется прослойка теплого воздуха, которая удерживается колосьями пшеницы. Во-вторых, именно после захода солнца, в вечернее и ночное время, ослабевает ветер вследствие выравнивания температуры различных частей подстилающей поверхности. Колосья пшеницы на полях позволяют визуализировать следы, оставляемые воздушными вихрями.

Проведенные исследования выявили, что следы в виде одного или нескольких колец оставляют лишь самые короткоживущие вихревые структуры при небольших градиентах температуры подстилающей поверхности (и, как следствие, воздуха).

Характеристики модельных вихрей (параметр закрутки)

Параметр закрутки:

$$S = U_{\phi} / U_z = \operatorname{ctg} \alpha$$

На рис. показан пример определения параметра закрутки с использованием единичной траектории (она расположена параллельно и немного выше вектора полной скорости) частицы магнезии.

Небольшие значения параметра закрутки говорят о существенном превышении вертикальных составляющих скорости над тангенциальными составляющими в исследуемых воздушных вихрях.



Обнаруженные высокие значения вертикальной составляющей скорости были неожиданны. По-видимому, наблюдаемые в экспериментах большие величины вертикальных скоростей могут являться разгадкой следующих явлений: 1) высокие вертикальные скорости объясняют имеющиеся в многочисленных описаниях очевидцев смерчей явления вывешивания и последующего переноса на большие расстояния тяжелых предметов и элементов конструкций, а также животных и людей; 2) большие вертикальные скорости (превышающие порой в 2–3 раза тангенциальные скорости) свидетельствуют о том, что величина суммарной скорости, реализуемой смерчами рекордной интенсивности (азимутальная скорость около 150 м/с), близка к максимально возможной скорости, т.е. звуковой.

Характеристики модельных вихрей (распределение скоростей)

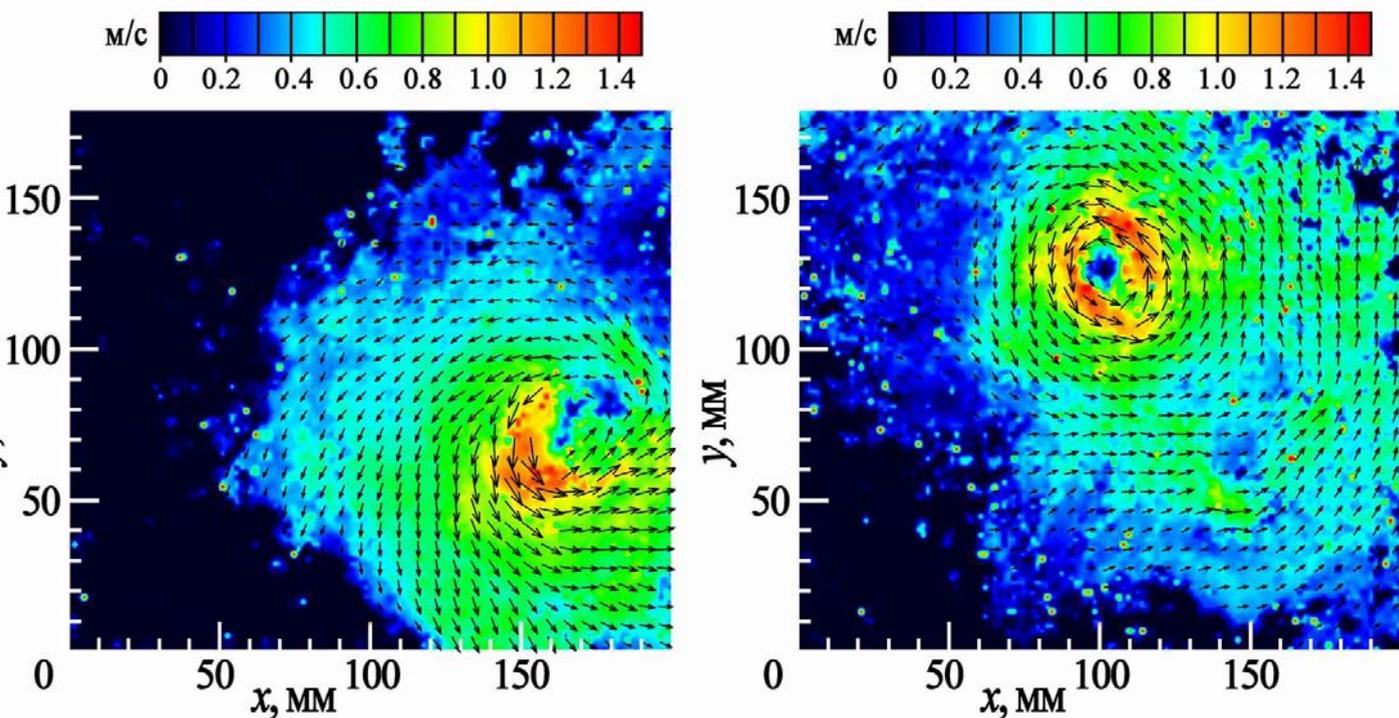
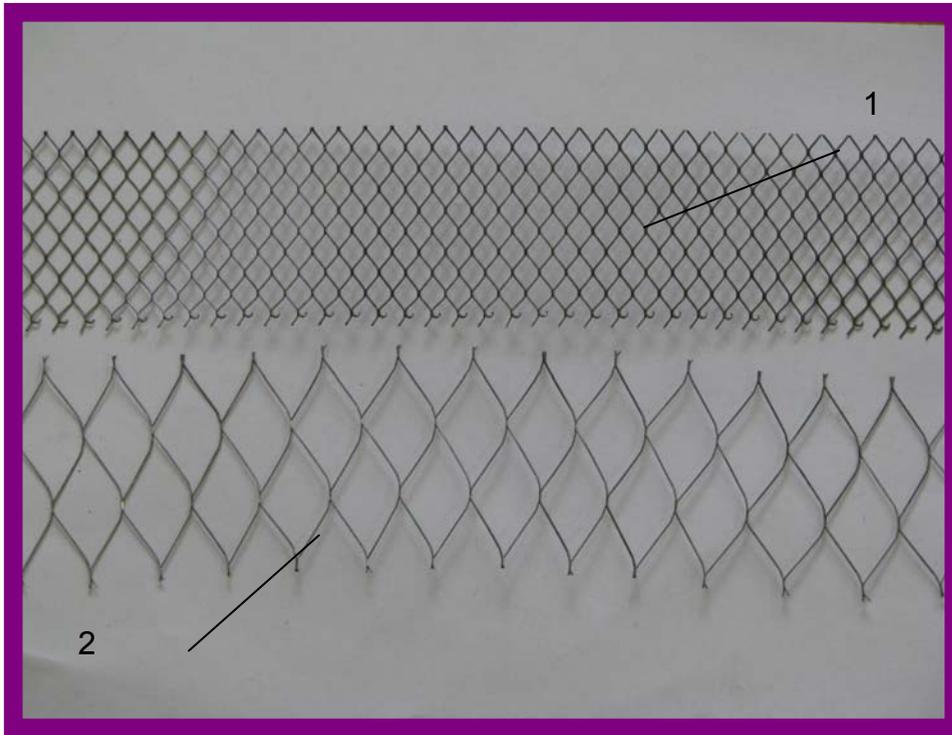


Рис. Типичная картина мгновенных скоростей в поперечном сечении воронки вихря (расстояние от лазерного ножа до поверхности равно 200 мм): (слева) – момент времени $t=0$; (справа) – $t=0,8$ с.

Детальное изучение полей скоростей в свободных концентрированных вихрях было проведено с использованием полевого измерителя скоростей «ПОЛИС», производимого Институтом теплофизики (ИТ СО РАН). Он позволяет проводить измерения трехмерных полей мгновенных скоростей в существенно нестационарных потоках, имеющих сложную геометрию, с высоким пространственно-временным разрешением и малыми погрешностями.

Пример измерений полей скоростей в поперечном сечении модельного лабораторного вихря показан на рис. Большой массив экспериментальной информации, касающейся измерений полей скоростей генерируемых вихревых структур, позволил сделать вывод о близости полученных распределений в воронке вихря к распределению скоростей в классическом вихре Рэнкина.

Изучение свободных вихрей (управление)



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

Характеристики некоторых сеток

Фотография некоторых сеток, использованных в экспериментах

Предложен и апробирован метод воздействия на воздушные смерчи (торнадо). Сущность метода заключается в расположении на пути распространения смерча препятствий в виде вертикальных сеток, имеющих различную высоту и размер ячеек. Эффективность метода верифицирована в лабораторных условиях путем изучения воздействия указанных препятствий на динамику свободного вихря, имеющего структуру, подобную реальным воздушным смерчам.

Изучение свободных вихрей (управление)

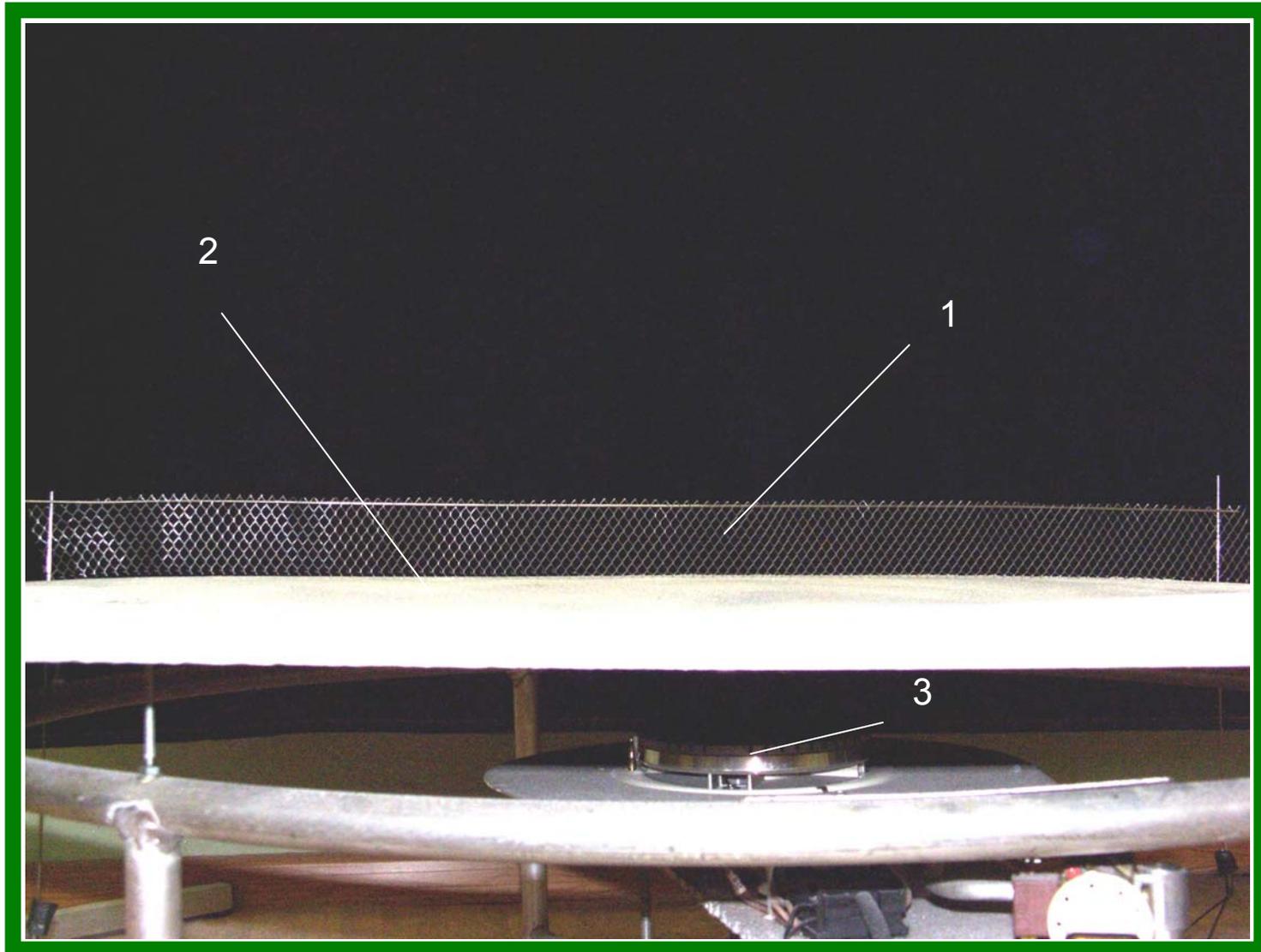


Схема установки сетки на подстилающей поверхности: 1 – сетка; 2 – подстилающая поверхность; 3 – газовая горелка (выключена).

Взаимодействие Модельного вихря с вертикальной сеткой



Выявлено **шесть основных вариантов поведения** вихрей:

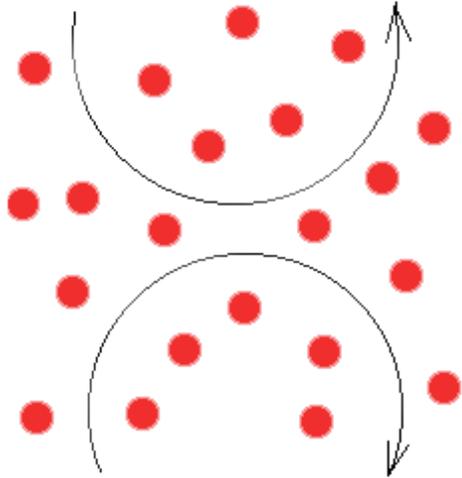
- 1) отчетливое перемещение вихря к сетке и его распад вблизи сетки без ее пересечения;
- 2) движение вихря к сетке, его замедление (вплоть до полной остановки) при приближении к ней и последующий распад;
- 3) перемещение вихря к сетке с последующим изменением направления, движением вдоль сетки (без 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 характеристиками (его ослабление).

Вывод - **использование сеточных заграждений решает (в той или иной степени) задачу управления характеристиками свободного вихря**, приводя к изменению пути его распространения

Физические основы метода

Малоинерционные частицы

Трата энергии вихрями на вовлечение частиц в пульсационное движение



Дополнительная диссипация турбулентности

Крупные частицы

Образование турбулентных следов за крупными частицами

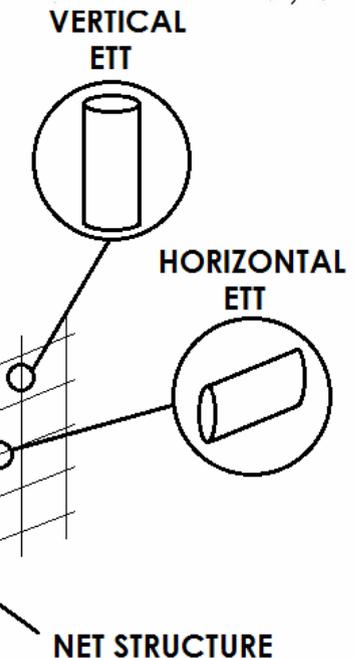
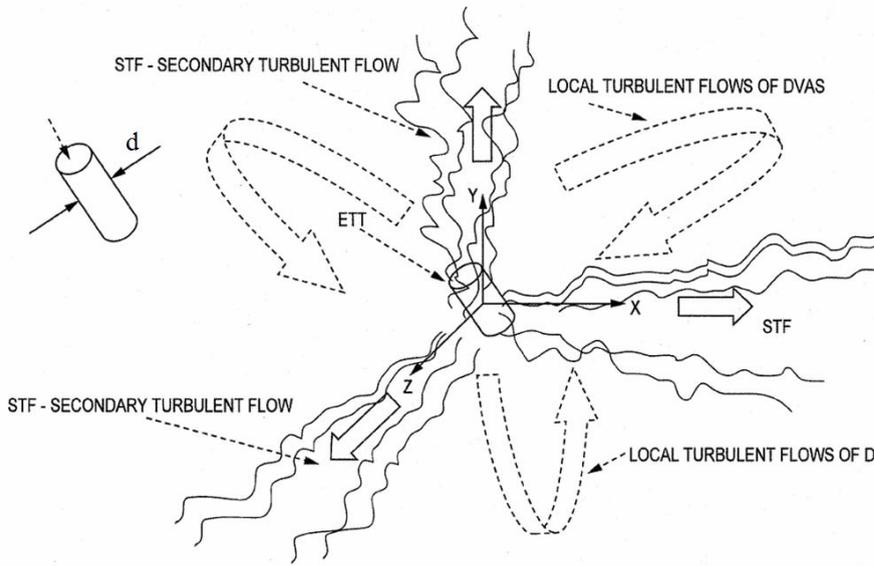
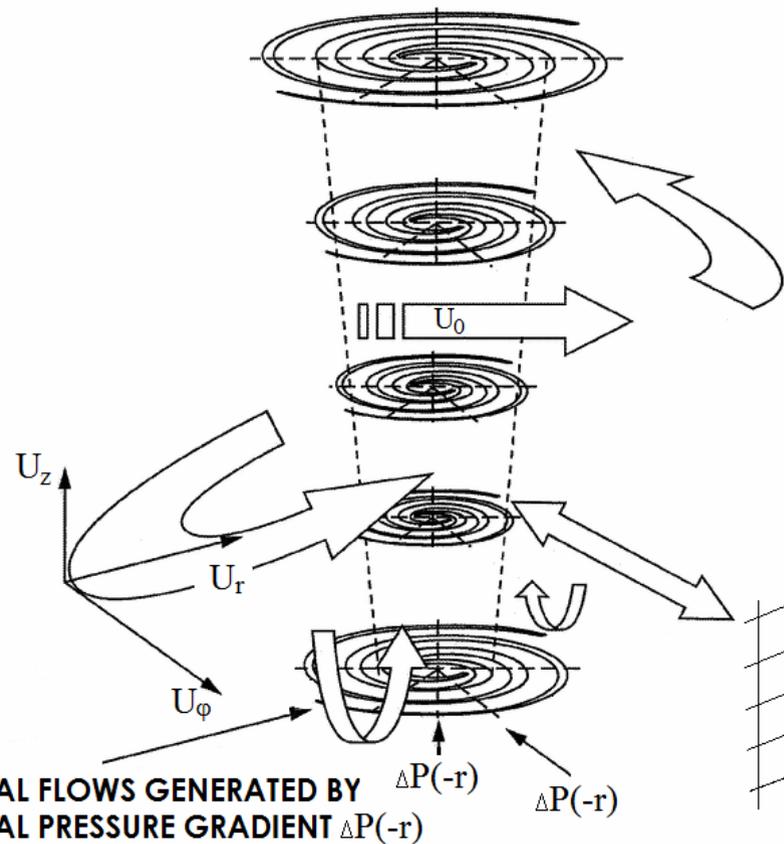


Дополнительная генерация турбулентности

Физические основы метода

Генерация мелкомасштабной турбулентности навстречу вихрю

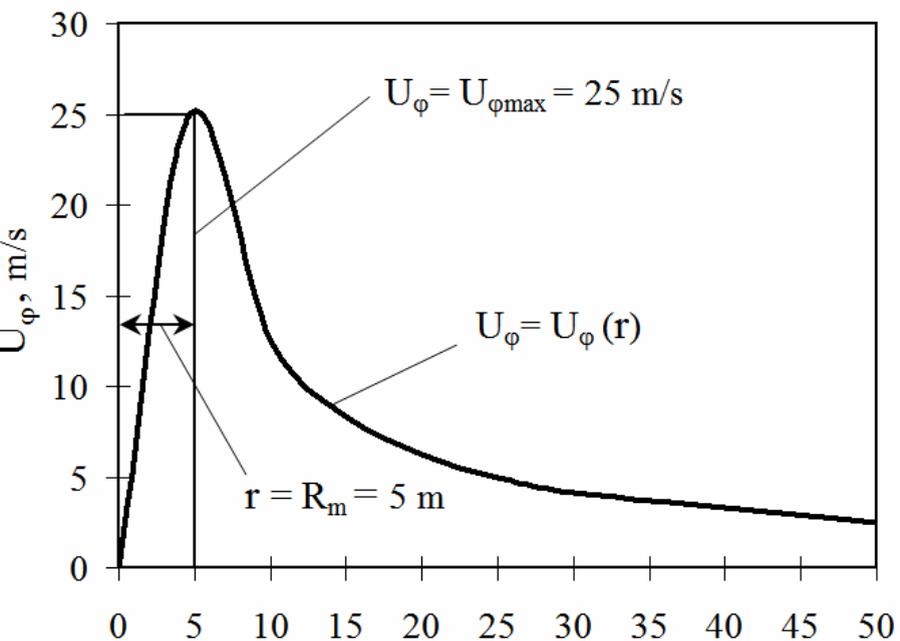
DYNAMIC VORTEX ATMOSPHERIC STRUCTURE (DVAS)



Условие генерации вторичного потока:

$$Re_d = \frac{U_\phi d}{\nu} \geq 400$$

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА



Распределение скорости в торнадо F0 (вихрь Рэнкина)

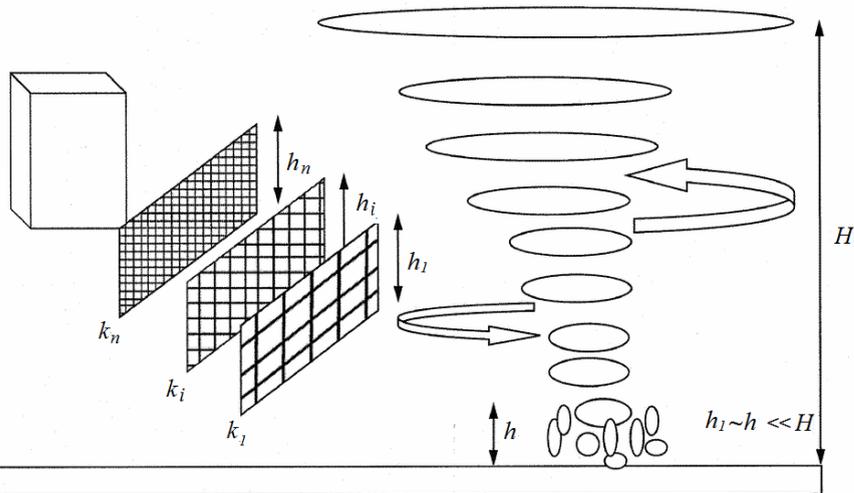
r, m

Tornado (Fujita scale)	$U_{\varphi\max}, m/s$	$R_m = 5 m$		$R_m = 10 m$	
		$d = 1 mm$	$d = 5 mm$	$d = 1 mm$	$d = 5 mm$
F0	25	20.8	104	41.6	208
F1	42	35	175	70	350
F2	60	50	250	100	500
F3	82	68.3	341.5	136.6	683
F4	105	87.5	437.5	175	875
F5	130	108.3	541.5	216.6	1083

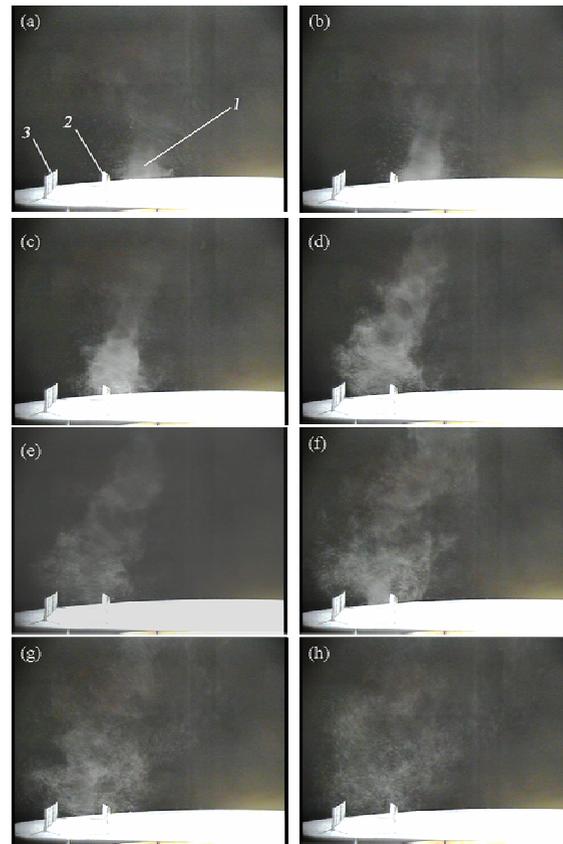
Расстояние (в метрах), на котором начинается взаимодействие вихря с преградой:

Физические основы метода

«Кластерная» концепция защитных препятствий

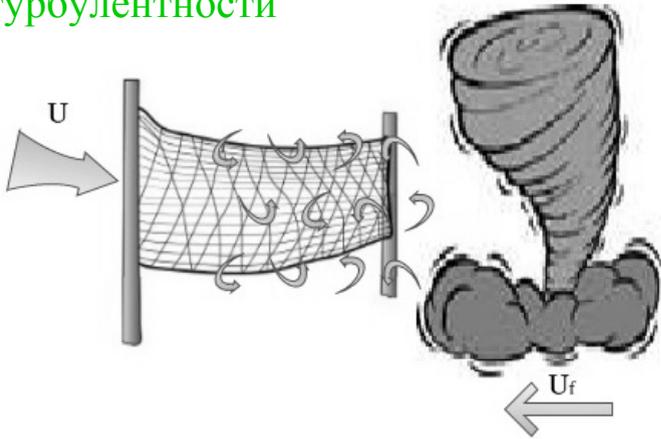


Видеозапись взаимодействия вихря с 2-мя сетками

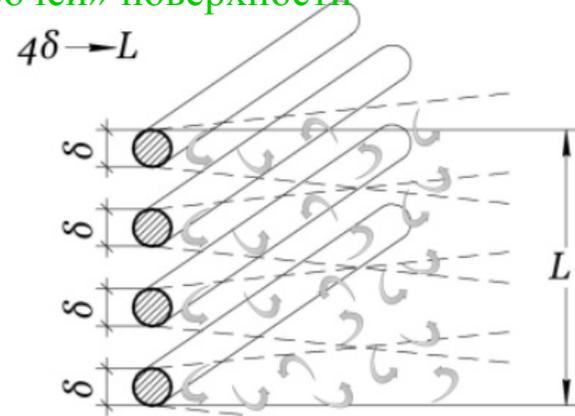


Физические основы и преимущества метода - 1

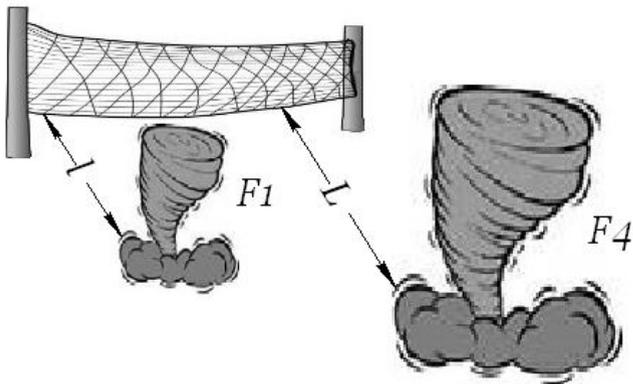
Генерация мелкомасштабной турбулентности



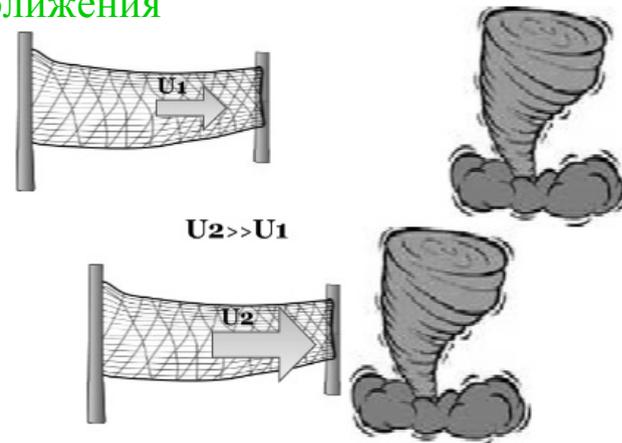
Эффект аэродинамического увеличения «рабочей» поверхности



Эффект дальнего действия

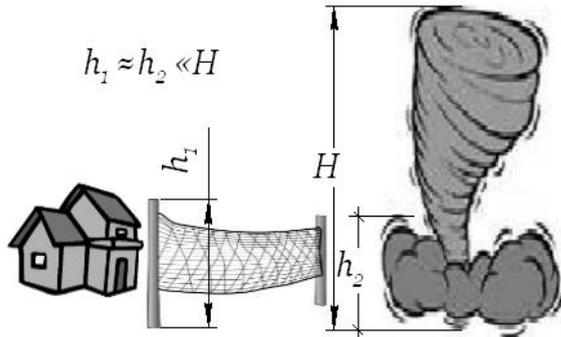


Эффект усиления воздействия по мере сближения

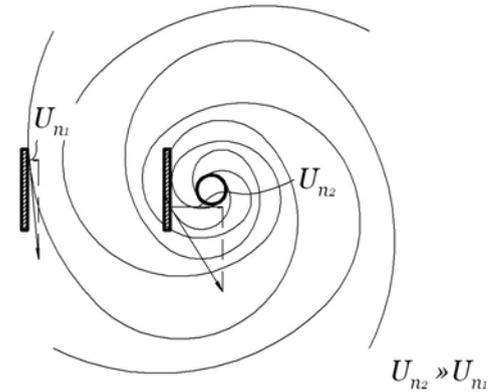


Физические основы и преимущества метода - 2

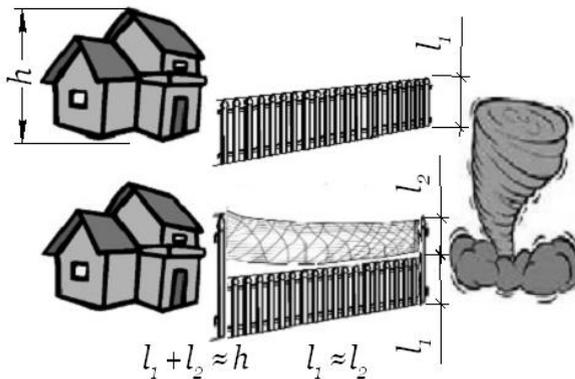
Небольшая высота сеточной конструкции



Эффект относительного увеличения размера заграждения по мере сближения



Эффект оперативности и сезонности



Эффект защиты от обломков



Экстраполяция результатов на вихри больших масштабов

1. Геометрический параметр сетки (на единицу длины)

$$G = \frac{h\delta}{a} \quad [м]$$

h – высота сетки

δ – диаметр «веревки»

a – размер ячейки

2. Энергия вихря (на единицу высоты)

$$E = \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{V^2}{2} \quad [Дж/м]$$

ρ – плотность воздуха

D – диаметр воронки

V – вертикальная скорость в воронке вихря

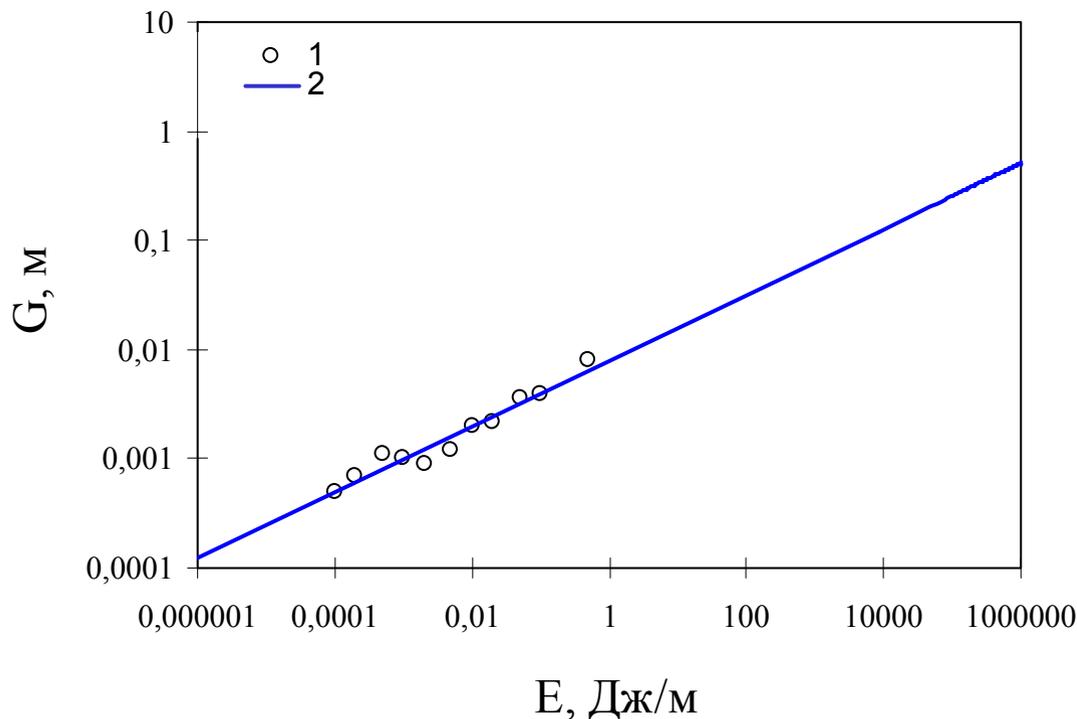


Рис. Зависимость «геометрия сетки – энергия вихря»

Работая на различных тепловых режимах, удавалось получать модельные вихревые структуры, энергия которых различалась на 4 порядка!

Некоторые развития экспериментов

1. Изучение вопросов генерации огненных вихрей



2. Использование «сухого льда» (диоксид углерода CO_2) в целях визуализации вихревых структур «сверху» и варьирования вертикального градиента температуры

ВЫВОДЫ

- 1) демонстрация **принципиальной возможности физического моделирования** свободных концентрированных вихрей без использования механических закручивающих устройств;
- 2) нахождение величин температур и темпов нагрева подстилающей поверхности и воздуха, а также их градиентов в вертикальном и горизонтальном направлениях, приводящих к **устойчивой генерации свободных вихрей различной интенсивности**;
- 3) оригинальные **данные изучения кинематики и динамики вихревых структур**, развивающихся над нагреваемой снизу подстилающей поверхностью, с использованием современных диагностических методов и средств;
- 4) анализ полученных данных на предмет **объяснения различных явлений, касающихся физики наблюдаемых в природе вихревых структур** и сопутствующие им (величины максимальных скоростей, реализуемых в торнадо; явление вывешивания и переноса предметов в смерчах; эффект «прыгания» смерчей; явление образования кругов (колец) на полях и др.);
- 5) **формулирование задачи изучения различных методов управления** нестационарными свободными концентрированными вихрями, подобными по своей структуре природным вихревым образованиям;
- 6) **пассивно-активный метод воздействия** на воздушные смерчи (торнадо), заключающийся в расположении на пути их распространения сеточных препятствий; верификация эффективности метода экспериментальным путем;
- 7) **анализ физических основ предложенного метода** управления природными вихрями определяющих его преимущества и готовность к практической реализации.

Выводы

Актуальность для РФ - Развиваемый метод управления вихревыми атмосферными образованиями может использоваться для выработки технических и организационных мер защиты важных стратегических объектов, определяющих оборонноспособность и энергобезопасность стран, в которых материальный ущерб и потери гражданского населения от смерчей незначительны.

Можно однозначно сделать вывод о полной беспомощности современного человека в противостоянии стихии. Примеров этому достаточно много, и они всем хорошо известны.

Вероятно, природа сама предоставляет шанс человечеству посредством факта самого существования воздушных смерчей, характеризующихся относительно малыми пространственно-временными масштабами и небольшой (несмотря на высокие значения скоростей) «энергетикой», и подсказывает начать с «малого» – с выработки средств защиты именно от них.