

# Физическое моделирование воздушных смерчей

**А.Ю. Вараксин**, зав. кафедрой<sup>1</sup>, заведующий отделением<sup>2</sup>, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

<sup>2</sup> Отделение теплофизики и энергетики Объединенного института высоких температур Российской академии наук

e-mail: varaksin\_a@mail.ru

## Ключевые слова:

атмосферные вихри,  
воздушные смерчи,  
физическое моделирование,  
метод защиты.

*Показана принципиальная возможность физического моделирования смерчей в лабораторных условиях без использования механических закручивающих устройств. Приведены результаты экспериментов по изучению возможности управления воздушными вихрями. Описан предложенный и апробированный метод воздействия на воздушные смерчи (торнадо), заключающийся в расположении на пути распространения вихревых структур препятствий в виде вертикальных сеток. Эффективность метода верифицирована в лабораторных условиях путем изучения воздействия указанных препятствий на динамику свободных нестационарных вихрей, имеющих структуру, подобную реальным воздушным смерчам. Кратко рассмотрены основные физические механизмы воздействия на смерчи предлагаемого пассивно-активного метода.*

## 1. Введение

Можно однозначно сделать вывод о полной беспомощности современного человека в противостоянии стихии. Примеров этого достаточно, и они всем хорошо известны. Самыми распространенными проявлениями стихии можно считать ветры различной силы и вихревые атмосферные образования, характеризующиеся широким спектром пространственно-временных масштабов. Несмотря на многочисленные попытки ученых из разных стран предложить различные способы воздействия на атмосферные вихри, к настоящему времени эффективные методы борьбы со стихией (ураганы, смерчи и т.п.) отсутствуют.

Воздушные смерчи в классическом понимании относятся к маловероятным событиям в среднем на территории России, однако их последствия могут быть весьма ощутимыми (рис. 1, 2, с.2 обложки). К сожалению, этого нельзя сказать об ураганах, также относящихся к вихревым атмосферным образованиям. Существует ряд регионов (например, Дальневосточный и Южный федеральные округа), в которых циклоническая активность крайне высока. Надо иметь в виду, что любые температурные аномалии (например, летом 2010 г.) приводят к резкому росту вероятности возникновения атмосферных вихрей различного масштаба и интенсивности. Помимо вихревых структур даже в Московском регионе 2–3 раза в год наблюдаются ветры штормовой, а в порывах – и ураганной силы,

ведущие к негативным последствиям. Фактического материала здесь можно привести много.

Например, 20 октября 2010 г. в Московской области из-за сильного ветра, вызвавшего падение деревьев и обрыв линий электропередач, временно вышли из строя 300 трансформаторных подстанций.

Воздействие экстремальных ветровых нагрузок, зачастую имеющих вихревую природу, и собственно атмосферных вихрей на различные объекты использования атомной энергии (ОИАЭ) является одним из примеров, когда чрезвычайная ситуация природного характера может привести к техногенной катастрофе планетарного масштаба. Пример тому – недавние события в Японии. К настоящему времени имеется (изданное в НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России) руководство по оценке смерчопасности территории при выборе площадок для строительства объектов атомной энергетики [1–3]. Но задача эффективной защиты ОИАЭ даже не ставилась.

Обеспечение защиты стратегически важных объектов, определяющих обороноспособность (аэродромы и т.п.) и энергетическую безопасность страны (АЭС, ТЭС, трансформаторные подстанции и т.п.), а также объектов социальной инфраструктуры (детские дошкольные учреждения, школы, больницы и т.п.) от ветровых нагрузок и атмосферных вихрей различной интенсивности представляется важной и актуальной задачей.

Целью настоящей статьи является описание принципиальной возможности физического моделирования в лабораторных условиях нестационарных воздушных вихрей, а также изучения вопросов управления их поведением.

## 2. Физическое моделирование смерчей

Ограниченные стенками вихревые течения формируют несколькими способами:

- посредством тангенциального соплового подвода среды;
- используя механические закручивающие устройства [4–6] (направляющие закручивающих лопаток, винтов, шнеков, внутреннего спирального оребрения и т.п.);
- интенсивного вращения корпусных элементов каналов (вращающихся труб).

Получаемые указанными способами стационарные вихревые потоки удобны для детального экспериментального описания, однако их характеристики могут значительно отличаться от параметров реальных свободных нестационарных вихревых структур.

Изучение свободных (неограниченных стенками) концентрированных (завихренность локализована в пространстве) нестационарных вихрей осложнено вследствие ряда причин – спонтанности образования, пространственно-временной нестабильности, практической невозможности управлять характеристиками и т.д. Отмеченные выше трудности стали причиной того, что к настоящему времени отсутствуют экспериментальные работы, в которых получены результаты по устойчивости и динамике свободных концентрированных вихрей, приемлемые для верификации математических моделей.

Используемая в работе простая установка, параметры тепловых режимов, а также последовательность проведения экспериментов подробно описаны в [7, 8]. 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 [9].

Эксперименты проводились при шести различных тепловых режимах – с различными временем нагрева ( $\tau_h = 60 - 180$  с), охлаждения ( $\tau_c = 600 - 1200$  с) и максимальной температурой в центре подстилающей поверхности ( $T_{c,max} = 420 - 610$  К).

Видеосъемка генерируемых вихрей проводилась с использованием цифровой видеокамеры (модель Sanyo VCC-6572P, Япония). Фотосъемка вихревых структур осуществлялась фотокамерой (модель Casio Exilim EX-S500, Китай). Для измерения мгновен-

ных скоростей модельных вихрей применялся полевой регистратор скоростей «ПОЛИС» (ИТ СО РАН).

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

На рис. 3 (см. с. 2 обложки) приведена типичная фотография относительно крупного и долгоживущего свободного нестационарного вихря. Покадровый анализ видеозаписей на различных тепловых режимах позволил получить и систематизировать важную информацию о следующих параметрах процесса генерации вихрей и их характеристиках:

- 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.

На рис. 4 (см. с. 2 обложки) показана полученная в эксперименте вихревая структура с целью детализации ее основных частей (внутренняя полость вихря, область восходящего потока, каскад вихря). На этом рисунке приведена для сравнения фотография реального торнадо в США. Несложно сделать вывод о схожести природных атмосферных вихрей и их лабораторных аналогов.

## 3. Управление поведением смерчей.

### Новый метод защиты

В работах [7–9] впервые была сформулирована и решена задача стабильной генерации свободных (неограниченных стенками) концентрированных (завихренность локализована в пространстве) тепловых (природа образования – неустойчивая стратификация) воздушных вихрей в лабораторных условиях без использования механических закручивающих устройств. Создаваемые вихри были существенно нестационарными и близкими по своей структуре к атмосферным вихрям. Таким образом, появилась возможность сформулировать новую задачу, имеющую большое прикладное значение: устойчивости и управления нестационарными свободными вихрями.

В [10, 11] предложен метод воздействия на вихревые атмосферные образования, заключающийся в

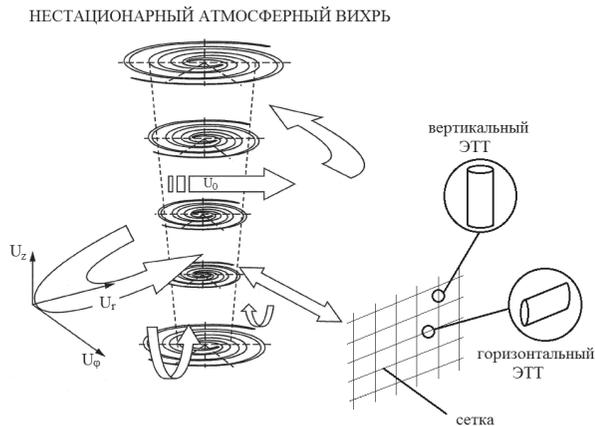


Рис. 5. Схематическое изображение нестационарного атмосферного вихря и сеточного заграждения ( $U_0$  – поступательная скорость перемещения вихря)

расположении на пути их распространения препятствий в виде вертикальных сеток.

**Основная идея метода.** На рис. 5 показан нестационарный атмосферный вихрь и заграждение, в качестве которого выступает вертикальная сетка. Течение в вихре характеризуется в каждой точке пространства своими значениями вертикальной  $U_z$ , радиальной  $U_r$  и азимутальной  $U_\phi$  скоростей. Отметим, что распределения этих скоростей в пространстве носят сильно неоднородный и нестационарный характер. Сеточное препятствие можно представить состоящим из вертикальных и горизонтальных цилиндрических элементов, называемых здесь элементарными «трансформерами» турбулентности (ЭТТ). Смысл такого названия поясним позже.

Из гидродинамики известно, что генерация развитых турбулентных следов за обтекаемым телом (сфера, цилиндр) будет иметь место при выполнении следующего условия

$$Re_d = \frac{Ud}{\nu} \geq 400, \quad (1)$$

где  $Re_d$  – число Рейнольдса,  $U$  – скорость относительного обтекания,  $d$  – характерный размер обтекаемого тела,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости среды.

Каждый горизонтальный цилиндрический элемент сеточной конструкции в месте своего расположения будет «взаимодействовать» с вертикальной  $U_z$  и радиальной  $U_r$  составляющими локальной скорости атмосферного вихря, генерируя – при соблюдении условия (1) – вторичные мелкомасштабные турбулентные потоки в соответствующих направлениях (рис. 5, 6). Вертикальные цилиндрические элементы сеточного заграждения будут «взаимодействовать» с радиальной  $U_r$  и азимутальной  $U_\phi$  составляющими локальной скорости вихревой структуры, генерируя вторичные мелкомасштабные турбулентные потоки в указанных направлениях.

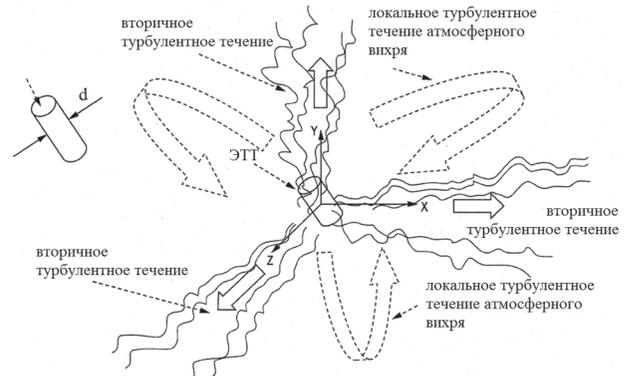


Рис. 6. Схема генерации вторичных турбулентных потоков при взаимодействии турбулентного течения атмосферного вихря с произвольно ориентированным в пространстве элементом сеточного заграждения (ЭТТ – элементарный «трансформер» турбулентности)

В процессе взаимодействия атмосферного вихревого образования с сеточным препятствием происходит преобразование крупномасштабной турбулентной энергии вихря в энергию вторичных мелкомасштабных течений. Отметим, что вторичные (неоднородные и нестационарные) потоки имеют составяющую, направленную навстречу приближающемуся атмосферному вихрю. Предполагается, что такая трансформация энергии будет приводить к нарушению осевой симметрии природного вихря, его дестабилизации, ослаблению и/или разрушению.

В [10, 11] была разработана кластерная концепция гарантированной защиты локальных территорий от разрушающего воздействия воздушных смерчей (торнадо). В ее основе лежит идея расположения на пути следования атмосферного вихря двух или нескольких (в общем случае) сеточных препятствий, последовательно воздействующих и ослабляющих его вплоть до полного разрушения (рис. 7).

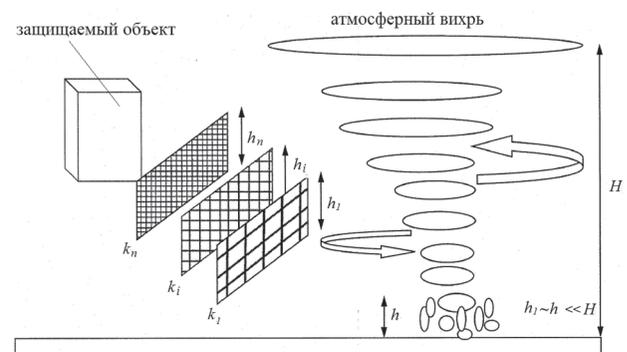


Рис. 7. Схема взаимного расположения атмосферного вихря, защищаемого объекта и трехмерного заграждения ( $H$  – высота атмосферного вихря;  $h$  – высота приземного слоя, формирующего вихрь;  $h_1 \dots h_n$  – высоты соответствующих сеток  $k_1 \dots k_n$ , образующих трехмерную защитную конструкцию)

**Экспериментальная верификация метода.** В [10, 11] приведены некоторые результаты по взаимодействию модельных воздушных вихрей с одиночными вертикальными сетками различной геометрии, устанавливаемыми на пути их следования. Выявлено шесть основных вариантов поведения вихрей при их взаимодействии с сетками:

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

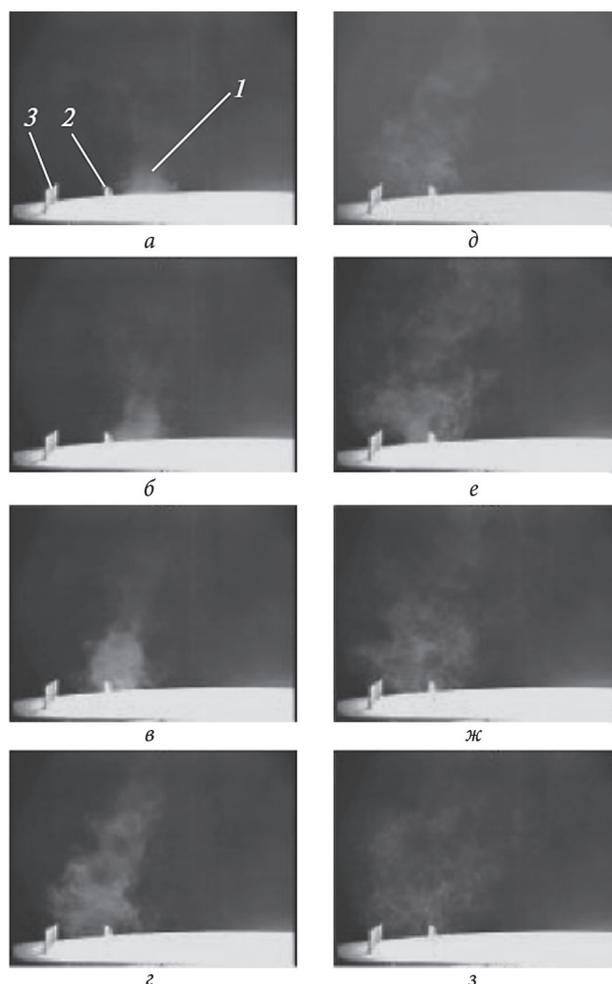
В этих работах сделан вывод, что использование сеточных ограждений решает (в той или иной степени) задачу управления характеристиками свободного вихря, приводя к изменению пути его распространения (варианты 2, 3 и 6), ослаблению (вариант 6) и распаду (варианты 1–5), правда, с некоторой вероятностью повторного зарождения (вариант 5).

Статистическая обработка полученных в ходе экспериментов видеозаписей позволила определить вероятность реализации различных вариантов взаимодействия вихря с препятствием в виде одиночной сетки. Эксперименты показали, что при уменьшении высоты сетки и диаметра проволоки и при увеличении размера ячейки сетки росла вероятность пересечения сетки вихрем (варианты 5 и 6) и его последующего зарождения после сетки (вариант 5).

В настоящей работе отчасти продублированы эксперименты [10, 11] по влиянию одиночных вертикальных сеток, а также получены новые данные о взаимодействии вихрей с двумя вертикальными сетками, установленными параллельно друг другу. Проведенные измерения полей мгновенных скоростей позволили сделать оценку энергии модельных вихрей (она приведена ниже) и выйти на качественно новый уровень анализа сложного процесса взаимодействия вихревых структур с сеточными препятствиями.

Ниже рассмотрим типичный пример взаимодействия вихря с двумя вертикальными сетками. В данном случае в качестве препятствия использовались две вертикальные металлические сетки (длина каждой 600 мм), которые располагались параллельно друг другу (расстояние между сетками 100 мм). Ближайшая к центру подстилающей поверхности сетка находилась на расстоянии 300 мм от него.

Выборочные кадры видеосъемки взаимодействия вихря с двумя вертикальными сетками приведены



**Рис. 8.** Фотографии вихря при его последовательном взаимодействии с двумя вертикальными сетками в разные моменты времени. 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. 1 – вихрь, 2 – сетка № 1 ( $G = 0,0021$ ), 3 – сетка № 2 ( $G = 0,00375$ )

на рис. 8. Каждый кадр 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. 8а и 8б) хорошо видно движение вихревой структуры справа налево и приближение ее к первой вертикальной сетке. На рис. 8в вихрь начинает пересекать первую сетку с некоторым замедлением (многократно наблюдаемый в экспериментах эффект, к сожалению, не так отчетливо различимый в силу малого количества приводимых кадров). На следующем кадре (рис. 8г) видно, что центр основания вихревой структуры (как и вся нижняя часть воронки вихря) располагается между двумя сетками. Уширение и размытие воронки вихря свидетельствуют о его ос-

лаблении (снижение вертикальной составляющей скорости воздуха в воронке). На рис. 8д видно, что вихревая структура распадается вследствие еще большего размыва, прекращения вихревого движения воздуха и отсутствия подхвата частиц с подстилающей поверхности. На рис. 8е виден подхват (между двумя сетками) новой порции частиц магнетики с поверхности. Правда, вскоре происходят его ослабление (рис. 8ж) и распад (рис. 8з).

Таким образом, была показана возможность эффективного воздействия располагаемых последовательно двух (или более) сеточных препятствий на вихревую структуру относительно большой интенсивности, когда установки одной сетки оказывается недостаточно.

**Обобщение экспериментальных данных.** Далее была предпринята попытка установить влияние некоторого геометрического параметра одиночного сеточного заграждения на величину предельной «энергетики» разрушаемых модельных вихрей.

*Геометрический параметр сетки.* Анализ полученных результатов о взаимодействии модельных вихрей с вертикальными сетками различной геометрии позволил предложить размерный параметр, учитывающий геометрию сетки, в виде

$$G = \frac{hd}{a}, \quad (2)$$

где  $h$  – высота сетки, используемой в экспериментах;  $d$  – диаметр проволоки сетки;  $a$  – размер ячейки.

В экспериментах использовано восемь сеток с различными значениями геометрического параметра  $G = 0,0005 - 0,01$  м. Сетка с самым низким значением геометрического параметра имела  $h = 0,01$  м,  $d = 10^{-4}$  м и  $a = 2 \cdot 10^{-3}$  м, а сетка с самым высоким параметром –  $h = 0,06$  м,  $d = 2 \cdot 10^{-3}$  м и  $a = 1,2 \cdot 10^{-2}$  м.

*Энергия модельного вихря.* Энергия генерируемых в лаборатории вихрей (на единицу высоты) может быть рассчитана с использованием соотношения

$$E = \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{U_{zm}^2}{2}, \quad (3)$$

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

Измеритель скорости «ПОЛИС» позволяло измерить поле скоростей и определить энергию модельных вихрей, а также ее изменение во времени. Как показали специальные тестовые измерения, средняя интегральная вертикальная составляющая скорости близка к соответствующей азимутальной составляющей, т.е.  $U_{zm} \approx U_{\phi m}$ . При этом допущении погреш-

ность определения энергии вихря находилась в пределах 50%.

Среднее интегральное значение азимутальной составляющей скорости определяется как

$$U_{\phi m} = \frac{1}{R} \int_0^R U_{\phi}(r) dr. \quad (4)$$

Здесь  $r$  – расстояние от центра вихря;  $r = R$  – условный радиус воронки вихря (расстояние от центра вихря, на котором значение скорости равно половине максимальной скорости,  $U_{\phi} = U_{\phi \max} / 2$ );  $U_{\phi}(r)$  – распределение азимутальной скорости в поперечном сечении воронки вихря, полученное в результате измерений.

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

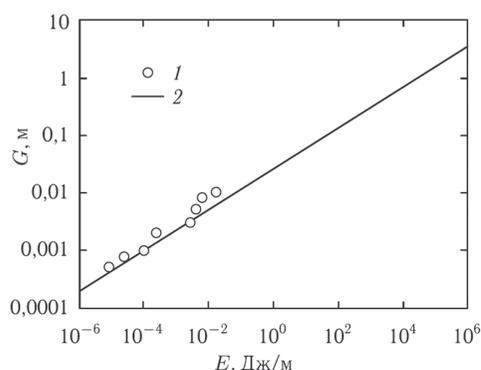
$$E = \frac{1}{\tau_{\max}} \int_0^{\tau_{\max}} E(\tau) d\tau, \quad (5)$$

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

Полученные экспериментальные данные об энергии модельных вихрей, разрушаемых одиночным сеточным препятствием различной геометрии, приведены на рис. 9.

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  $E \approx 50\,000$  Дж/м (это соответствует энергии тор-



**Рис. 9.** Влияние комплексного геометрического параметра сеточного заграждения на энергию разрушаемых модельных вихрей (1 – экспериментальные данные; 2 – экстраполяция экспериментальных данных на вихри больших масштабов)

надо категории F1 по шкале Фуджиты, имеющему воронку диаметром 10 м).

#### 4. Физические основы метода и его преимущества

Перечислим основные физические механизмы (основы) воздействия предлагаемого метода на смерч, определяющие его преимущества.

**Отказ от сплошного препятствия.** Сплошные препятствия (например, сплошной забор) относятся к пассивным метод защиты от смерча. Из-за их сплошности суммарная сила воздействия смерча на такие препятствия максимальная. Так, средний смерч категории F5 по шкале Фуджиты с максимальной скоростью 130 м/с оказывает усилие на сплошное препятствие, равное приблизительно 10000 Н/м<sup>2</sup>. Вследствие этого, оно должно быть рассчитано на такую нагрузку, что ведет к чрезмерной дороговизне сплошных конструкций. Учитывая эффект «прыгания» смерчей, такие препятствия, несмотря на их большую высоту, не обеспечивают 100%-ную защиты.

Предлагаемые сеточные конструкции имеют в десять, а порой и в десятки, раз меньшее аэродинамическое сопротивление, что обеспечивает их устойчивость при воздействии смерча. Указанное обстоятельство ведет к многократному удешевлению таких конструкций по сравнению со сплошными препятствиями.

**Генерация мелкомасштабной турбулентности.** Предлагаемые вертикальные сеточные конструкции при соблюдении определенных условий (см. выражение (1)) будут вызывать генерацию вторичного течения. В общем случае данное течение будет нестационарным, неоднородным и трехмерным и, что очень важно, будет иметь составляющую скорости, направленную навстречу воронке смерча.

Предлагаемый метод защиты относится одновременно и к пассивным, и к активным методам, т.е. он пассивно-активный. К пассивным – поскольку система находится в режиме ожидания прихода вихревой структуры. К активным – поскольку предполагает интерактивное аэродинамическое взаимодействие сеточного препятствия с набегающим вихревым потоком, результатом которого становится дестабилизация и/или разрушение вихревой структуры. Заметим, что в отличие от всех активных методов защиты, предлагаемый метод не требует внешних источников энергии. Необходимую для воздействия на атмосферный вихрь энергию поставляет сам вихрь.

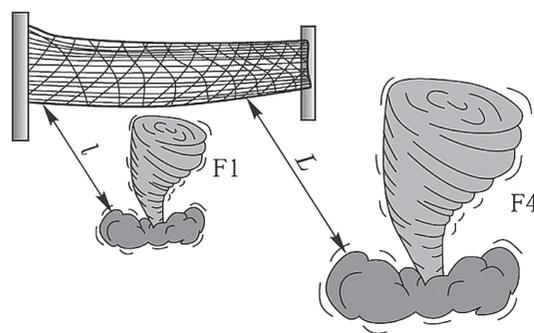
**Эффект аэродинамического увеличения «рабочей» поверхности.** Элементы сеточного препятствия на определенных режимах генерируют турбулентные следы, размеры которых всегда превышают их характерный размер (например, диаметр проволоки и веревки, из которых изготовлена сеточная конструкция). На некотором расстоянии от плоскости

сеточного препятствия турбулентные следы начинают интерферировать между собой, приводя к эффекту аэродинамического увеличения изначально небольшой «рабочей» поверхности, приближая ее к максимальной величине, характерной для сплошного препятствия.

**Эффект дальнего действия.** Учитывая, что распределение азимутальной скорости в смерче с достаточной точностью соответствует распределению скорости в вихре Рэнкина, генерация мелкомасштабной турбулентности, т.е. «работа» защитной сеточной конструкции, начинается на достаточно больших расстояниях от атмосферного вихря (рис. 10). Расстояние от центра смерча до сеточного препятствия, при котором начинается генерация вторичного турбулентного потока, зависит, прежде всего, от его силы (величины максимальной скорости воздуха), характерного размера (диаметра) элементов сеточной конструкции и диаметра воронки вихря.

Простые оценки показывают, что средний смерч категории F1 по шкале Фуджиты, характеризующийся максимальной скоростью 42 м/с и имеющий воронку радиусом 5 м, начнет «взаимодействовать» с сеточным препятствием (характерный диаметр элемента конструкции 5 мм) на расстоянии около 70 м. Отметим, что чем сильнее смерч (выше значение максимальной скорости) и чем больше его воронка, тем на большем расстоянии начинается «работа» защитной сеточной конструкции.

**Эффект усиления воздействия по мере сближения.** С уменьшением расстояния между смерчем и защитной сеточной конструкцией возрастает скорость «прососа воздуха» через нее, что приводит к росту энергии мелкомасштабного турбулентного течения, генерируемого сеточным препятствием. Это приводит к усилению влияния сеточного препятствия на приближающийся смерч (рис. 11).



**Рис. 10.** Чем мощнее вихревая структура, тем на большем расстоянии начинается ее взаимодействие с сеточной конструкцией (L – расстояния, при которых начинается генерация вторичного течения в случаях слабой и мощной вихревых структур; F1, F4 – категории торнадо по шкале Фуджиты)

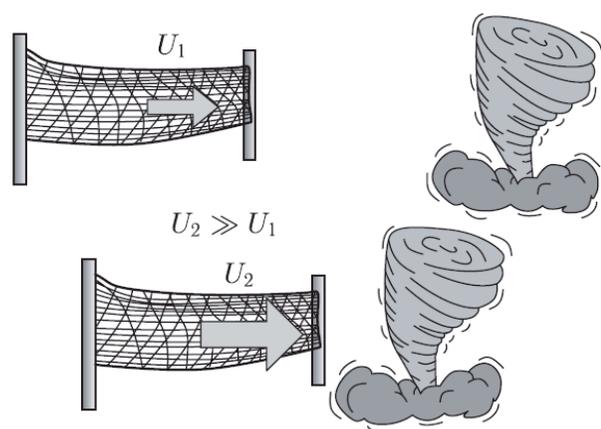


Рис. 11. Иллюстрация эффекта усиления воздействия сеточной конструкции по мере приближения вихревой структуры ( $U_1, U_2$  – характерные скорости генерируемого сеткой вторичного течения при большом и малом расстояниях до атмосферного вихря)

**Небольшая высота сеточной конструкции.** Установленное на пути следования смерча вертикальное сеточное препятствие воздействует на восходящее закрученное течение, развивающееся в приземном слое и формирующее атмосферный вихрь. Как отчетливо выявили эксперименты авторов, достаточно высокую эффективность показали сеточные конструкции, высота которых в 10–50 раз была ниже видимой высоты модельного лабораторного вихря. Это позволяет сделать предположение, что высота приземного слоя, в котором реализуется восходящее закрученное течение, также в десятки раз меньше полной высоты смерча. Учитывая типичную высоту реальных смерчей, высота сеточных заграждений должна быть относительно небольшой (5–8 м) и сравнимой с высотой защищаемых жилых конструкций.

**Эффект увеличения относительного размера сеточного заграждения по мере сближения.** С умень-

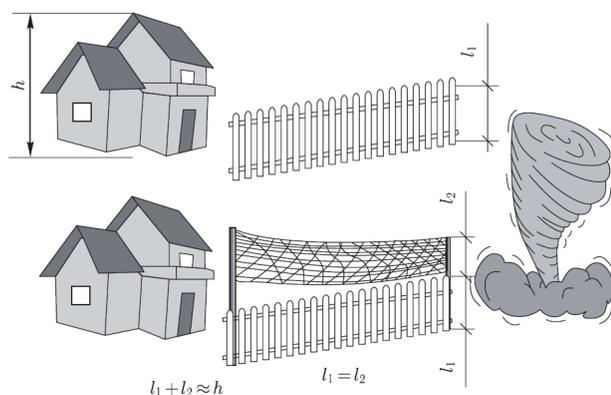


Рис. 12. Сезонная установка сеточной конструкции на имеющееся стационарное ограждение ( $h$  – высота защищаемого объекта;  $l_1$  – высота стационарного заграждения;  $l_2$  – высота сеточной конструкции)

шением расстояния между смерчем и сеточной конструкцией снижается кривизна линий тока воздуха, протекающего через заграждение. Это приводит к эффекту роста относительной протяженности сеточного препятствия, а также к увеличению неоднородности генерируемого вторичного течения, что способствует дестабилизации атмосферного вихря.

**Эффект оперативности и сезонности.** В силу своей простоты сеточные заграждения могут быть установлены в кратчайшие сроки, скажем, в течение нескольких минут. Это неоспоримое преимущество сеточных конструкций по сравнению с любыми пассивными методами защиты от смерчей. Установка сеточных конструкций может иметь сезонный характер: например, они возводятся только на время сезонного пика смерчей – один-два месяца. Более того, сеточные заграждения могут проектироваться как некоторые сезонные надстройки (высотой 1,5–3 м) к имеющимся стационарным ограждениям (рис. 12). Для большей эффективности данные стационарные ограждения (высотой 1,5–3 м) должны также удовлетворять требованиям, предъявляемым к сеточным защитным конструкциям (неплошные и т.п.).

**Эффект защиты от обломков.** Помимо эффективного воздействия на гидродинамическую структуру смерча сеточные заграждения прекрасно исполняют функцию защиты от обломков различных размеров и происхождения.

## 5. Выводы

Вероятно, природа предоставляет человечеству шанс победить ее 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. Сеточные защитные сооружения, эффективность которых наглядно продемонстрировали проведенные эксперименты, в силу простоты изготовления и дешевизны могут оказаться вне конкуренции – с экономической точки зрения – среди предлагаемых сегодня методов противодействия ветровым нагрузкам вихревого характера и смерчам.

Развиваемый пассивно-активный метод управления вихревыми атмосферными структурами может быть использован для выработки технических и организационных мер защиты важных стратегических объектов, определяющих обороноспособность и энергетическую безопасность стран, в которых (прежде всего, в силу географического расположения) материальный ущерб и потери гражданского населения от атмосферных вихрей (ураганы, смерчи и т.п.)

незначительны. К таким странам и относится Российская Федерация.

*Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ (Государствен-*

*ный контракт № 2012-1.2.1-12-000-2007-059), Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Горение и взрыв», а также Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-08-00831).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рекомендации по оценке характеристик смерча для объектов использования атомной энергии. РБ-022-01. Постановление Госатомнадзора России №17. 28.12.2001 г.
2. Рекомендации по оценке характеристик смерча для объектов использования атомной энергии. РБ-022-01 // Вестник Госатомнадзора России. – 2002. – №1. – С. 59–90.
3. Рекомендации по определению расчетных характеристик смерчей при размещении атомных станций. РД 95 10444-91.
4. Алексеевко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. – 504 с.
5. Ward N.B. The exploration of certain features of tornado dynamics using laboratory model // J. Atmos. Sci. – 1972. – V. 29. – P. 1194–1204.
6. Haan F.L., Sarkar P.P., Gallus W.A. Design, construction, and performance of a large tornado simulator for wind engineering applications // Engineering Structures. – 2008. V.30. – P. 1146–1159.
7. Вараксин А.Ю., Ромаши М.Э., Копейцев В.Н., Таекин С.И. О возможности физического моделирования воздушных смерчей в лабораторных условиях // Теплофизика высоких температур. – 2008. – Т. 46. – № 6. – С. 957–960.
8. Varaksin A.Y., Romash M.E., Kopeitsev V.N., Gorbachev M.A. Experimental study of wall-free non-stationary vortices generation due to air unstable stratification // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2012. – V. 55. – P. 6567–6572.
9. Вараксин А.Ю., Ромаши М.Э., Копейцев В.Н., Таекин С.И. Параметры неустойчивой стратификации воздуха, приводящей к генерации свободных вихрей // Теплофизика высоких температур. – 2010. – Т. 48. – № 2. – С. 269–273.
10. Вараксин А.Ю., Ромаши М.Э., Копейцев В.Н., Горбачев М.А. Метод воздействия на свободные нестационарные воздушные вихри // Теплофизика высоких температур. – 2012. – Т. 50. – № 4. – С. 533–537.
11. Varaksin A.Y., Romash M.E., Kopeitsev V.N. Effect of net structures on wall-free non-stationary air heat vortices // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2013. – V. 64. – P. 817–828.

## Physical Modeling of Tornadoes

**A.Yu. Varaksin**, Head of Chair of Bauman Moscow State Technical University, Head of Section of Physics and Energetics, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of RAS, Doctor of Physics and Mathematics, Professor

*The principal possibility of tornadoes physical modeling in vitro without use of mechanical twisting devices has been shown. The results of experiments on studying related to opportunities of whirlwinds control are given. The offered and approved method of impact on whirlwinds (tornado), consisting in an arrangement of obstacles in the form of vertical grids in a way of vortex structures distribution, has been described. The method efficiency is verified in vitro by studying of specified obstacles influence on dynamics of the free non-stationary whirlwinds having structure, similar to real tornadoes. The main physical mechanisms related to impact on tornadoes of the offered passive and active method have been briefly considered.*

**Keywords:** atmospheric whirlwinds, tornadoes, physical modeling, protection method

### Шкалы Фуджиты и Бофорта

Шкала Фуджиты (англ. Fujita scale), также известная как Шкала Фуджиты-Пирсона или F-шкала, была введена профессором Теодором Фуджитой в 1971 году для классификации торнадо. Шкала состоит из 13 категорий: от F0 до F12. При этом интервал между F0 и F1 соответствует 11-му и 12-му баллам по шкале Бофорта. Категории торнадо от F6 до F12 были введены в качестве теоретических, и вне зависимости от скорости ветра в торнадо, даже если она превышает 512 км/ч, максимальная присваиваемая категория в любом случае будет F5. Наиболее часто встречаются смерчи категории F1 и F2. Реже – более высоких категорий. Теоретическая скорость смерча шкалы F12 равна скорости звука.

Шкала Бофорта – двенадцатибалльная шкала, принятая Всемирной метеорологической организацией для приближенной оценки скорости ветра по его воздействию на наземные предметы или по волнению в открытом море. Средняя скорость ветра указывается на стандартной высоте 10 м над открытой ровной поверхностью. Шкала разработана английским адмиралом Ф. Бофортом в 1806 году. С 1874 года принята для использования в международной синоптической практике. Первоначально в ней не указывалась скорость ветра (добавлена в 1926 году). В 1955 году, чтобы различать ураганные ветра разной силы, Бюро погоды США расширило шкалу до 17 баллов.