

**Физическое моделирование магнитогидродинамических процессов
развития мощных тропических циклонов**

Гридин В.Н.*, Смахтин А.П.*

*Центр информационных технологий в проектировании РАН,
ул. Маршала Бирюзова, 7а, Одинцово, Московская область, 143003, Россия*

**e-mail: info@ditc.ras.ru*

Статья поступила 22.11.2019

Аннотация

Тропические циклоны относятся к наиболее разрушительным стихийным бедствиям на Земле, вызывающим многочисленные человеческие жертвы и разрушения инженерных сооружений в районах, подвергшихся их воздействию. Отсутствие, в настоящее время, адекватной модели процессов зарождения и развития тропических циклонов не позволяет разработать стратегию успешной борьбы с этими стихийными бедствиями.

В данной статье рассматривается физическая модель динамики мощных тропических циклонов как результат воздействия атмосферного электричества на первоначальный воздушный вихрь. Показана возможность создания модельной физической установки для исследования этого сложного природного явления на основе магнитогидродинамической модели протекающих процессов.

Ключевые слова: атмосферное электричество, магнитогидродинамическое вращение, Z- и Θ -пинч, теория подобия магнитной гидродинамики, критерии подобия.

Введение

Исследование механизмов зарождения и развития мощных разрушительных циклонов представляет собой актуальную научно-техническую проблему, так как на этой основе возможно создание активных методов воздействия на зарождающийся воздушный вихрь с целью его подавления на начальной стадии развития тропического циклона.

Традиционными районами воздействия разрушительных тропических циклонов являются в северном полушарии: Тихий океан к востоку от Филиппин и Южно-Китайское море, Тихий океан к западу от Калифорнии (США) и Мексики, Атлантический океан к востоку от Больших Антильских островов, Бенгальский залив и Аравийское море; в южном полушарии: Тихий океан к востоку от Новой Гвинеи, Индийский океан к востоку от Мадагаскара и к северо-западу от Австралии [1]. Что касается территории Российской Федерации, то разрушительные циклоны наблюдаются в районах Дальнего Востока. Иногда подобные явления возникают в прибрежных районах Чёрного моря и в средней полосе России в виде мощных смерчей [2]. В физике атмосферы смерчи относятся к мезо-масштабным циклонам, характерные диаметры которых лежат в диапазоне от 10 метров до 100 метров. Диаметры тропических циклонов значительно больше и достигают величин от 100 километров и более.

В результате воздействия мощных тропических циклонов гибнут люди, возникают серьёзные разрушения инженерных сооружений, происходит общее нарушение экологии окружающей среды. В настоящее время отсутствуют надёжные экспериментальные данные о параметрах мощных тропических циклонов из-за практически непреодолимых проблем размещения научной аппаратуры внутри мощного воздушного вихря – аппаратура как правило разрушается под его влиянием. Такой параметр как скорость воздушного вихря оценивается по результатам разрушений после прохождения торнадо. Например, часто наблюдались случаи, когда мелкая галька пробивала стекла, подобно пуле, без повреждения краёв пробоины; летящие доски пробивали стены деревянных домов, металлические листы и прочее. В результате существуют оценки скоростей воздушного вихря внутри мощного торнадо превышающие скорость звука.

Естественно, что тропические торнадо и смерчи оказывают крайне негативное влияние на современную авиацию. 21 сентября 2019 года у восточного побережья США возник ураган «Дориан», которому была присвоена максимальная пятая «катастрофическая» категория по шкале ураганов Саффира-Симсона. Временами, по оценке наблюдателей, скорость воздушного вихря превышала величину 350 км/час, было серьёзно повреждено более 13 тысяч домов; а ущерб, нанесённый районам бедствия, составил сумму 3,5 - 6,5 млрд. долларов США. Из-за угрозы урагана «Дориан» в аэропортах Флориды были отменены более тысячи авиарейсов

Из истории авиации известен случай, когда в сентябре 1952 года ураган второй категории «Эйбл» практически полностью разрушил более 70

стратегических бомбардировщиков типа В-36. Размеры этих самолётов значительны – размах крыльев равен 70 метрам. У этих самолётов были разворочены или разорваны фюзеляжи, оторваны крылья, некоторые самолёты были сброшены на соседние самолёты.

Отсутствие, в настоящее время, адекватной физической модели зарождения и развития тропических циклонов не позволяет разработать стратегию успешной борьбы с этими стихийными бедствиями. Пока борьба с негативным влиянием разрушительных тропических циклонов сводится к пассивному предупреждению населения о возможном стихийном бедствии с целью обеспечения своевременной эвакуации людей из потенциально опасных районов в безопасные. В результате количество погибших от тропических циклонов уменьшается в десятки раз, но назвать эти меры эффективными нельзя. Актуальность задачи создания надёжных и эффективных методов подавления мощных тропических циклонов на начальной стадии их развития не вызывает сомнений. Решение этой задачи возможно лишь на основе глубокого понимания процессов зарождения и развития мощных тропических циклонов.

Современное состояние исследований природы тропических циклонов

В настоящее время существует два подхода в создании физической модели мощных тропических циклонов: термодинамический и электродинамический [3]. В первом случае в основе исследуемых процессов лежат газодинамические процессы зарождения и развития мощных атмосферных вихрей с учётом температурного влияния поверхности океана, чья температура в этих условиях по результатам

многочисленных наблюдения должна быть выше 27 °С [1, 4]. В работе [4] тропический циклон рассматривается как модель природного теплового двигателя, работающего по термодинамическому циклу Карно.

Второй подход связан с воздействием атмосферного электричества на процесс усиления тропических циклонов. Впервые на возможность электрической природы мощных тропических циклонов в 40-ые годы 19 века обратили внимание Hare R., Bacon F. и Peltier J.C.A. В 1960 г. Vonnegut B. опубликовал статью [5], в которой также оценил влияние атмосферного электричества с точки зрения энергетики грозы на процесс развития мощного тропического циклона. Во всех этих работах влияние атмосферного электричества рассматривалось как источник дополнительного теплового воздействия на атмосферу в виде джоулева разогрева воздуха за счет протекания атмосферных токов. Таким образом, эти электрические модели принципиально совпадают с тепловыми моделями, поскольку добавляют лишь дополнительный источник разогрева воздушного вихря.

Однако очевидно, что атмосферное электричество может обладает более широким спектром механизмов электродинамического воздействия на эволюцию тропических циклонов в сравнении с приведёнными выше процессами влияния атмосферного электричества на развитие мощных тропических циклонов. Необходимо, прежде всего, учесть взаимодействие атмосферных токов с собственным магнитным полем, которое достаточно хорошо изучено в плазмодинамике.

Известно, что тепловое ускорение заряженных частиц существенно менее эффективно в сравнении с электродинамическим ускорением. Очевидно, что физическая модель столь сложного природного явления как тропический циклон включает элементы как теплофизической модели, так и электродинамической модели. Актуальным вопросом является оценка степени влияния каждого из рассматриваемых механизмов на различных этапах зарождения и усиления циклона, сравнительный анализ вклада различных механизмов на эволюцию мощного тропического циклона.

В работе [3] рассмотрена магнитогидродинамическая модель динамики тропических циклонов, согласно которой происходит ускорение конусообразного воздушного вихря за счёт азимутальной силы Ампера взаимодействия радиального тока с собственным вертикальным магнитным полем, источником которого являются азимутальные атмосферные токи, протекающие в объёме конусообразного вихря. В какой-то степени подобный подход к изучению природы тропических циклонов был изложен в работе [10], однако в ней рассматривались процессы взаимодействия электрических токов атмосферного вихря с магнитным полем Земли. Учитывая весьма малую величину индукции магнитного поля Земли, нам представляется, что вклад этого процесса в динамику тропического циклона незначителен.

На наш взгляд в приведённых выше работах не учтён ещё один, весьма эффективный, механизм ускорения воздушного вихря за счёт взаимодействия вертикальных атмосферных токов с собственным азимутальным магнитным полем.

Впервые эта идея была предложена Е.Ю. Красильниковым в работах [5, 6]. В дальнейшем, исследования в этом направлении были продолжены в Центре информационных технологий в проектировании (ЦИТП) РАН по программе Президиума РАН «Оценка различных факторов в динамике экстремальных природных явлений и их негативных последствий» [7 - 9]. В какой-то степени подобный подход к изучению природы тропических циклонов был изложен в работе [11], однако в ней рассматриваются процессы взаимодействия электрических токов атмосферного вихря с магнитным полем Земли, в то время как в [6] рассматриваются процессы взаимодействия атмосферных токов с собственным магнитным полем. Проведённые нами оценки показали, что последний механизм более эффективен.

В работе [6] приведены результаты анализа динамики тропического циклона с использованием изображений районов зарождения и интенсификации тропических циклонов, полученных в ходе мониторинга земной поверхности с помощью искусственных спутников Земли. За последнее время опубликованы фундаментальные монографии, посвященные вопросам мониторинга земной поверхности и, в частности, районов зарождения и интенсификации тропических циклонов, на основе изучения которых появилась возможность более глубокого анализа природы тропических циклонов [11, 12].

Оценки, основанные на анализе структуры предгрозовых облаков и распределения электрических зарядов в них и на поверхности Земли в районе надвигающейся грозы показывают, что в атмосфере Земли существуют достаточно

сильные вертикальные электрические поля [14]. Эти поля, с одной стороны, удерживают огромные массы воды в атмосфере Земли и, с другой стороны, создают условия для интенсификации атмосферного вихря на стадии их перехода в мощный разрушительный топический циклон.

Многочисленные данные как наземных, так и космических наблюдений за сильными тропическими циклонами подтверждают электродинамическую природу атмосферных явлений, сопровождающих процесс усиления воздушного вихря. Наземные наблюдения показывают, что развитие разрушительных тропических циклонов всегда сопровождается интенсивными грозами и что внутри, так называемого, «хобота» наблюдаются многочисленные вспышки электрических разрядов. Кроме того, до 78% гроз, наблюдаемых в течение года, приходится на тропическую и субтропическую зону Земли (от 30° северной широты до 30° южной широты), то есть в тех районах, где в основном возникают разрушительные тропические циклоны. Отмеченные обстоятельства подтверждают, по нашему мнению, ключевую роль электромагнитных явлений в процессах динамики тропических циклонов.

Кроме того, электрическая активность тропических циклонов характерна для начального этапа усиления циклона на стадии тропического шторма [11]. В работе [12] отмечены явления образования центра электрической активности, видимого в смерчевом облаке в виде округленного пятна светло-голубого цвета, которое появляется за 30 - 90 минут до образования смерча. Существуют многочисленные свидетельства, что смерчи, зачастую, сопровождаются светящимися колоннами,

огненными шарами, молниями в воронке и другими световыми явлениями, природа которых несомненно связана с атмосферным электричеством.

Об электрической природе тропических циклонов свидетельствует и тот факт, что спутниковый мониторинг районов существования сильных тропических циклонов зафиксировал низкочастотные электромагнитные колебания, а также потоки заряженных частиц, высыпающихся из радиационных поясов Земли в ионосферу в области тропических циклонов [13]. Кроме того, по результатам дистанционного наблюдения за мощными тропическими циклонами с помощью самолётного радиолокатора в СВЧ диапазоне 0,1 - 300 мегагерц было обнаружено радиоизлучение в периоды до, во время и после мощных гроз, сопровождающихся смерчами [15].

Тропические циклоны возникают, как правило, из так называемых суперячейковых облаков, как правило в форме наковальни, отличительной особенностью которых является наличие вращающихся восходящих воздушных потоков, называемых мезоциклонами.

Необходимо отметить, что были зафиксированы пыльные бури на поверхности Марса, сопровождаемые сильными грозами [16]. Авторы этих исследований предполагали, что при этом напряженность электрического поля E имела величину порядка 500 кВ/м при концентрации электронов $n_e = 10^6 \text{ см}^{-3}$. Кроме того, можно предположить, что такие наблюдаемые природные явления как Большое Красное пятно на Юпитере и Большое Тёмное пятно на Нептуне, вполне могут быть объяснены с помощью магнитогидродинамической модели вихревых

процессов в атмосфере Юпитера и Нептуна. Эта гипотеза опирается на универсальный характер природных процессов в космосе.

Магнитогидродинамическая модель интенсификации тропических циклонов

Для проверки адекватности предлагаемой магнитогидродинамической модели реальным динамическим процессам тропических циклонов проведем оценку основных параметров циклона Olivia, возникший 24 сентября 1994 на западе южной Калифорнии. Достаточно полные данные по структуре и параметрам этого циклона опубликованы в [17]. Измерения проводились с борта самолета с помощью радара с длиной волны излучения 5,5 см и 3,2 см. В частности, период вращения Olivia равен 3,5 часа.

Многочисленные эксперименты параметров предгрозовых облаков показывают, что внутри облака величина электрических зарядов, питающих молнии, равна 10 - 100 Кл, напряженность электрического поля E равна $(1 - 3) \cdot 10^5$ В/м, а эффективная электропроводность в облаке почти на два порядка выше, чем в окружающей атмосфере. О наличии сильных вертикальных электрических полей в предгрозовых облаках свидетельствуют экспериментальные данные, опубликованные в [18].

В хорошую погоду величина плотности атмосферного электрического тока над поверхностью Мирового океана практически постоянна и оценивается величиной порядка 10^{-2} А/м². Таким образом в предгрозовых облаках плотность

электрического тока может достигать величины порядка 1 А/м^2 . Взаимодействие вертикальных атмосферных токов с собственным азимутальным магнитным полем приводит к возникновению силы Ампера, направленной к центру вращения атмосферного вихря. Эта сила, являясь центростремительной силой, приводит к сжатию атмосферного вихря. Подобное явление известно в физике газового разряда как Z-пинч. В результате, во вращающемся предгрозовом облаке происходит увеличение центростремительной силы и, следовательно, рост скорости вращения атмосферных вихрей. Радиус воздушного вихря уменьшается и происходит увеличение скорости вращения вихря. Последнее утверждение основано на том, что, как известно, магнитное поле не совершает работы и, следовательно, сохраняется момент количества движения воздушного вихря. Оценки свидетельствуют, что величина силы Ампера в предгрозовых облаках сравнима с силами газодинамического давления, обеспечивающими первоначальную закрутку облака как следствие эффекта Кармана. В процессе усиления тропического циклона может происходить увеличение скорости вращения воздуха вблизи «глаза» циклона до значений порядка 150 км/час и выше. При этом, как известно, внутри «глаза» скорость воздуха практически нулевая и стоит идеальная погода.

Можно предположить, что существование эффекта Z-пинча обусловлено протеканием, так называемого, тихого тлеющего разряда в предгрозовых облаках в течение характерного времени интенсификации первоначального атмосферного вихря до стадии разрушительного тропического циклона, т.е. в течение 4 - 5 суток. Известно, что тихие тлеющие разряды характерны для высоких слоев атмосферы 30

- 40 км, где под воздействием солнечного излучения возникает электропроводность атмосферы, достаточная для создания тлеющего разряда, и происходит генерация молекул озонового слоя в атмосфере Земли.

При сжатии вихря происходит увеличение размеров капель, несущих на себе электрические заряды предгрозовых облаков, и нарушаются условия удержания этой массы водяных капель на высотах 5 – 7 км силами электрического поля. Как результат, возникают сильнейшие ливни. Многочисленные наблюдения свидетельствуют, что разрушительные тропические циклоны сопровождаются, как правило, сильными ливнями и грозами.

Первые работы по исследованию Z-пинча связаны с идеей по осуществлению реакции управляемого термоядерного синтеза [23]. В результате при разрядных токах порядка ($10^2 - 10^3$) кА в течение микросекунд, т.е. в результате осуществления быстрого Z-пинча, были получены первые нейтроны из плазмы.

Имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные по величинам плотностей атмосферных токов свидетельствуют, что их величины лежат в диапазоне от десятых долей A/m^2 в хорошую погоду над поверхностью океана до (1 - 10) A/m^2 в случае грозы над поверхностью океана. Учитывая, что диаметр первоначального воздушного вихря имеет величину порядка сотен километров, эффекты взаимодействия небольших по плотности атмосферных токов с собственным магнитным полем могут быть весьма заметными. Эти эффекты объясняются тем, что с ростом диаметра воздушного вихря собственное магнитное

поле вертикальных атмосферных токов возрастает пропорционально радиусу воздушного вихря.

Диаметр тропического циклона Olivia был равен 60 км. При предполагаемой величине плотности вертикальных электрических токов $j_z = 0,265 \text{ А/м}^2$ в суперячейковых облаках индукция азимутального магнитного поля вокруг облака меняется от 0 в центре вращающегося облака до величины порядка $B_\varphi = 0,003 \text{ Тл}$ на периферии облака диаметром 60 км. При этом плотность силы Ампера на периферии облака будет порядка $F_A = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$, причём величина этой силы линейно снижается до нуля в центре вращения облака. При этом расчетная длительность периода вращения циклона 5,2 часа. Сравнение этой величины с периодом вращения циклона торнадо Olivia 3,5 часа, определённого экспериментально в ходе мониторинга параметров циклона Olivia из космоса, показывает достаточно хорошую сходимость результатов в условиях весьма скудной информации о параметрах прегрозового облака и параметрах воздушного вихря в процессе усиления тропического циклона. В дальнейшем, при наличии более полной картины об интегральных и локальных параметрах тропических циклонов, а именно: распределение плотности воздушного вихря, напряжённости электрического поля и плотности атмосферных токов по радиусу тропического циклона в процессе его усиления, появится возможность совершенствования физической и математической моделей динамических процессов, протекающих в тропических циклонах.

Эти оценки параметров тропических циклонов подчёркивают актуальность физического моделирования процессов усиления мощных тропических циклонов.

Математическая модель интенсификации тропических циклонов

В результате анализа магнитогидродинамической модели развития тропического циклона можно создать систему уравнений, лежащих в основе математической модели динамических процессов мощных тропических циклонов:

1. Уравнение Навье Стокса в цилиндрических координатах в предположении, что изменениями параметров воздушного вихря по высоте вихря можно, в первом приближении, пренебречь в сравнении с изменениями этих же параметров в радиальном направлении, то есть $\partial/\partial z = 0$, и производная $\partial/\partial \varphi = 0$ из-за симметрии воздушного вихря по азимуту φ :

В проекции на ось r :

$$\rho(\partial V_r/\partial t + V_r \partial V_r/\partial r - V_\varphi^2/r) = -\partial p/\partial r + \mu[1/r \cdot \partial/\partial r(r \cdot \partial V_r/\partial r) + V_r/r^2] + F_{Ar} \quad (1);$$

В азимутальном направлении φ :

$$\rho(\partial V_\varphi/\partial t - V_r \cdot \partial V_\varphi/\partial r + V_r V_\varphi/r) = \mu[1/r \cdot \partial/\partial r(r \cdot \partial V_\varphi/\partial r) - V_\varphi/r^2] \quad (2);$$

где:

t – время;

V_r – радиальная составляющая скорости воздушного вихря;

V_φ – азимутальная составляющая скорости воздушного вихря;

μ – коэффициент динамической вязкости влажного предгрозового воздуха;

F_{Ar} - плотность радиальной составляющей силы Ампера, возникающей за счёт взаимодействия вертикальных электрических токов j_z с собственным азимутальным магнитным поле B_ϕ . Эта сила представляет собой центробежную силу.

2. Закон сохранения кинетической энергии $W_{кин}$ вращения воздушного вихря в силу того, что магнитное поле работы не совершает:

$$W_{кин} = J\omega^2/2 = const \quad (3),$$

где

J – момент инерции;

ω – угловая частота вращения.

Момент инерции полого цилиндра относительно оси вращения равен:

$$J = M(R_1^2 + R_2^2)/2 \quad (4),$$

где

M – масса воздушного вихря;

R_1 – внешний радиус цилиндра;

R_2 – внутренний радиус цилиндра.

В процессе вращения воздушного вихря происходит сжатие вихря из-за Z-пинча, что приводит к увеличению скорости вращения вихря. Другими словами, уменьшение радиусов R_1 и R_2 сопровождается увеличением окружной скорости воздушного вихря.

Объемная плотность силы Ампера F_A , направленная по радиусу от периферии вихря к центру вращения, определяется:

$$F_{Ar} = j_z \cdot B_\varphi \quad (5),$$

где

j_z - плотность вертикальных электрических токов в предгрозовом облаке:

B_φ – индукция азимутального собственного магнитного поля.

Сила Ампера F_A является центростремительной силой, равной

$$F_A(r) = M \cdot \omega^2 \cdot r \quad (6),$$

где

r – текущий радиус воздушного вихря.

Изменение азимутально магнитного поля по радиусу воздушного вихря определяется уравнением:

$$B_\varphi(r) = \mu_0 \cdot j_z \cdot r / 2 = 6,28 \cdot 10^{-7} \cdot j_z r \quad (7)$$

Экспериментальная установка для модельного исследования процессов развития мощных тропических циклонов.

Для экспериментальной проверки гипотезы о магнитогидродинамической природе динамики тропических циклонов необходимо провести физический модельный эксперимент по взаимодействию токов, протекающих по модельному рабочему телу, с собственным магнитным полем, то есть смоделировать Z-пинч и Θ -пинч. Как известно, Z-пинч возникает при взаимодействии вертикальных электрических токов с азимутальным собственным магнитным полем, в то время как Θ -пинч возникает при взаимодействии азимутальных электрических токов с осевым собственным магнитным полем. В результате действия Z-пинча и Θ -пинча происходит самосжатие плазменного образования. Основная проблема постановки

такого модельного эксперимента заключается в том, что диаметр натурального воздушного вихря тропического циклона составляет величину порядка сотен километров при относительно небольших величинах плотности вертикальных атмосферных токов. Однако, благодаря большим размерам вихря величина собственного магнитного поля на периферии вихря достигает величины порядка 0,003 Тл. Предполагается провести эксперименты на моделях значительно меньших по диаметру, что требует создания относительно больших плотностей токов для получения требуемых магнитных полей. Все это ведёт к необходимости при создании модельной установки тропического циклона применения теории подобия на основе использования безразмерных критериев подобия. При этом необходимо выбрать модельной рабочее тело, удельная масса которого и его электрическая проводимость соответствовали критериям подобия.

Теория подобия в аэродинамических экспериментах разработана с использованием безразмерных критериев подобия, таких как число Маха M , число Струхаля Sh , число Фруда Fr , число Эйлера Eu , число Рейнольдса Re и других. В магнитной гидродинамике используются такие безразмерные критерии как число магнитного давления R_B , магнитное число Рейнольдса Re_m , число Гартмана Ha [25, 26]. При этом важно иметь в виду, что на практике, как правило, полного подобия, то есть подобия по всем параметрам и равенства всех безразмерных критериев невозможно. Можно реализовать модельный эксперимент, в котором будут реализованы условия неполного, или частичного подобия. В этом случае

необходимо определить порядок величин всех критериев подобия и ограничиться теми, которые имеют существенное значение для данного эксперимента [27].

Исходная система уравнений движения воздушного вихря (1) и (2) в безразмерной виде может быть записана (безразмерные параметры выделены полужирным шрифтом):

$$\mathbf{Sh} \cdot \rho \cdot \partial \mathbf{V}_r / \partial t + \rho \cdot (\mathbf{V}_r \cdot \partial \mathbf{V}_r / \partial \mathbf{r} - \mathbf{V}_\varphi^2 / \mathbf{r}) = \quad (8);$$

$$= \mathbf{Eu} \cdot (-\partial p / \partial \mathbf{r}) + \mathbf{Re}^{-1} \cdot \mu [1 / \mathbf{r} \cdot \partial / \partial \mathbf{r} (\mathbf{r} \cdot \partial \mathbf{V}_r / \partial \mathbf{r}) + \mathbf{V}_r / \mathbf{r}^2] + \mathbf{Ha} \cdot \mathbf{F}_{Ar}$$

$$\mathbf{Sh} \cdot \rho \cdot \partial \mathbf{V}_\varphi / \partial t - \rho \cdot (\mathbf{V}_r \cdot \partial \mathbf{V}_\varphi / \partial \mathbf{r} + \mathbf{V}_r \mathbf{V}_\varphi / \mathbf{r}) = \mathbf{Re}^{-1} \cdot \mu [1 / \mathbf{r} \cdot \partial / \partial \mathbf{r} (\mathbf{r} \cdot \partial \mathbf{V}_\varphi / \partial \mathbf{r}) - \mathbf{V}_\varphi / \mathbf{r}^2] \quad (9);$$

В нашем случае физического моделирования параметрами моделирования являются:

- диаметр воздушного вихря тропического циклона порядка 100 км;
- плотность вертикальных атмосферных токов порядка (0,1 - 1,0) А/м²;
- величина индукция азимутального магнитного поля V_φ порядка сотых долей

Тл.

При выборе параметров модельной экспериментальной установки необходимо определить следующие параметры модельной установки:

- диаметр экспериментальной установки должны быть порядка сотен миллиметров, то есть на несколько порядков меньше характерных размеров тропического циклона;

- величина плотности вертикальных электрических токов должна быть значительно выше характерных величин плотности вертикальных атмосферных токов с тем, чтобы при значительно меньших масштабах экспериментальной

установки создать соответствующие азимутальные магнитные поля и плотность силы Ампера как произведение плотности тока j_z на величину индукции азимутального магнитного поля B_ϕ ;

Выбор параметров модельной экспериментальной установки, естественно, определяется равенством безразмерных параметров подобия.

Целью физического моделирования магнитогидродинамических процессов усиления мощных тропических циклонов под воздействием атмосферного электричества является подтверждение концепции магнитогидродинамической модели процессов усиления воздушного вихря и экспериментальное исследование параметров динамики вихря.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда
Фундаментальных Исследований (грант № 19-07-00924).*

Библиографический список

1. Минина Л.С. Практика нефанализа. - Л.: Гидрометеиздат, 1970. - 336 с.
2. Аджиев А.Х., Купович Г.В. Атмосферно-электрические явления на Северном Кавказе. – Таганрог: Изд-во ТРГУ, 2004. - 122 с.
3. Бояревич В.В., Фрейберг Я.Ж., Щилова Е.И., Щербинин Э.В. Электровихревые течения. – Рига: Зинатне, 1985. - 315 с.
4. Kerry A. Emanuel. The Theory of Hurricanes // Annual Review of Fluid Mechanics, 1991, no. 23, pp. 179 – 191.

5. Vonnegut B. Electrical Theory of Tornadoes // Journal of Geophysical Research, 1960, vol. 65, no. 1, pp. 203 – 212.
6. Krasilnikov E.Yu. Electromagnetohydrodynamic Nature of Tropical Cyclones, Hurricanes, and Tornadoes // Journal of Geophysical Research, 1997, vol. 102, pp. 13571 - 13580.
7. Krasilnikov E.Yu. Electromagnetohydrodynamic Intensification Mechanism of Tropical and Extratropical Cyclones, Hurricanes and Tornadoes and Method of their Prevention // 7th PAMIR International Conference on Fundamental and Applied MHD, Presqu'île de Giens - France, September 8 - 12, 2008.
8. Gridin V., Krasilnikov E. Suppression of powerful clouds and prevention of destructive tropical and extra-tropical cyclones, severe thunderstorms, tornadoes, and catastrophic floods. The International Emergency Management Society // 9-th Annual Conference Proceedings, Canada, 2002, pp. 354 - 366.
9. Гридин В.Н., Смахтин А.П. Моделирование методов активного подавления тропических циклонов на стадии их зарождения и развития // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2017. № 3 (188). С. 131 - 139.
10. Магнитогидродинамическая модель развития тропических циклонов и способов их подавления // Труды международной научно-технической конференции «Информационные технологии и математическое моделирование систем» - М.: Планета, 2015. С. 65 - 69.

11. Боев А.Г. О вращении тропического циклона // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения. 2010. № 4. С. 193 - 198.
12. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974, - 712 с.
13. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. – М.: Научный мир, 2009. - 692 с.
14. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф. Космический мониторинг тропических циклонов. – М.: Научный мир, 2009. - 506 с.
15. Апполонов В.В., Плетнёв Н.В. Моделирование триггерной молнии в атмосфере // Труды МАИ. 2014. № 78. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=53468>
16. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы : Эксперим. физика атмосферы. - Л.: Гидрометеиздат, 1990. - 462 с.
17. Ерохин Н.С., Зольникова Н.Н., Михайловская Л.А. К теории электромагнитных индикаторов тропических циклонов. - М.: Институт космических исследований РАН, 1996. - 28 с.
18. Голицын Г.Г. Ураганы, полярные и тропические, их энергия и размеры, количественный критерий возникновения // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 5. С. 579 - 590.
19. Farrell W.M., Kaiser M.L., Desch M.D. et.al. Detecting electrical activity from Martian dust storms // Journal of Geophysical Research, 1999, vol. 104, no. 2, pp. 3795 - 3801.

20. Black P.G., Black R.A. et al. Electrical Activity of the Hurricane. Preprints // 23rd Conference of Radar Meteorology and the Conference on Cloud Physics, American Meteorology Society, 1986, vol. 67, no. 5, pp.624 - 643.
21. Берюлев Г.П., Волков В.В., Литинецкий А.В. и др. Метеорологические аспекты исследовательских полетов в ураганах // Метеорология и гидрология. 1991. № 6. С. 5 - 13.
22. Наливкин Д.В. Ураганы, бури и смерчи. - Л.: Наука, 1969. - 487 с.
23. Black R.A., Hallett J. Electrification of the Hurricane // Journal of the Atmospheric Sciences, 1999, vol. 56, pp. 2004 – 2028.
24. Вихрев В.В., Брагинский С.И. Динамика Z-пинча. Вопросы теории плазмы. Вып. 10. - М.: Атомиздат, 1980. - 320 с.
25. Reasor P.D. et. al. Low-Wavenumber Structure and Evolution of the Hurricane Inner Core Observed by Airborne Dual-Doppler Radar // Monthly Weather Review, 2000, vol. 128, pp. 1653 - 1680.
26. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. - М.: Наука, 1969. - 824 с.
27. Кравчук М.О., Кудимов Н.Ф., Сафронов А.В. Вопросы моделирования турбулентности для расчёта сверхзвуковых высокотемпературных струй // Труды МАИ. 2015. № 82. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=58536>
28. Ларина Е.В., Крюков И.А., Иванов И.Э. Моделирование осесимметричных струйных течений с использованием дифференциальных моделей турбулентной вязкости // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75565>

29. Харитонов А.М. Техника и методы аэродинамического эксперимента. Аэродинамические трубы и газодинамические установки. - Новосибирск: Издательство НГТУ, 2005. Ч. 1. - 220 с.