

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Маслова Сергея Алексеевича
на тему: «Роль электромагнитных механизмов
в процессе формирования торнадо»
по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Моделирование опасных явлений природы, в том числе и зарождения из грозовых облаков воронок торнадо, является сложной и актуальной задачей.

Сложность моделирования обусловлена неоднозначностью причинно-следственных связей в процессе генерации торнадо и перекрестным взаимовлиянием различных факторов гравитационной, гидродинамической и электромагнитной природы; а также фактическим отсутствием надежных экспериментальных данных о распределении полей давления, скорости и завихренности внутри воронок сильных торнадо. О таких распределениях обычно судят по косвенным признакам разрушений после прохождения торнадо.

За последнее время актуальность моделирования торнадо существенно возросла как за счет увеличения числа и энергетики торнадо, так и расширения географии и времени их возникновения не только в США, но и других регионах мира, в том числе вблизи полярного круга (Ханты-Мансийск, Сургут), что ранее не наблюдалось. Более того, все чаще торнадо возникают сериями: в 2003 г. за первую неделю мая более 400 торнадо прошло по 20 штатам в США, там же в 2011 г. за две недели апреля возникло более 550 торнадо (половина среднегодовой нормы). Аномальная серия смерчей со сверхбыстрой генерацией была зафиксирована в Амурском заливе в сентябре 1997 г. вблизи Владивостока.

С конца XIX века (с первой гидродинамической модели торнадо А. Пуанкаре) и до настоящего времени опубликовано большое количество статей,

обзоров и монографий, посвященных как натурным и радарным наблюдениям, так и расчетам гидродинамических характеристик потоков в торнадо, особенно в их развитой и самой разрушительной стадии, когда воронка смерча уже достигает подстилающей морской или земной поверхности.

Большинство моделей основано на вихревых решениях гидродинамических уравнений Эйлера или Навье – Стокса, чем-то похожих на течения в воронке торнадо. Но лишь в немногих работах учитывалась неразрывная связь торнадо с материнским грозовым облаком, анализировались энергетические причины, а также электромагнитные факторы формирования воронки и механизмы усиления ее завихренности.

Диссертационная работа С.А. Маслова, в которой рассматривается начальная стадия формирования воронки смерча (до момента ее касания с подстилающей поверхностью) из нижней части вращающегося грозового облака (торнадо-циклона), выгодно отличается от большинства работ по моделированию торнадо, так как учитывает сильные возмущения атмосферного электрического поля под материнским грозовым облаком на основе принципиально новой двухпараметрической формулы. Эта формула адекватно описывает перезарядку дипольного облака (низ заряжен отрицательно, а верх – положительно) в трипольное, когда в центре нижней части отрицательного заряда появляется дополнительная область с положительным зарядом. Ранее в геофизической литературе по отдельности применялись 4-параметрическая формула для дипольного грозового облака и 6-параметрическая для трипольного, что не позволяло описывать плавный параметрический переход сильных возмущений электрического поля под грозовыми облаками с разной электрической структурой.

Еще раз подчеркнем, что исследование торнадо с учетом тесной связи его воронки с материнским грозовым облаком (торнадо-циклоном) является сложной проблемой. Во-первых, факт наличия области положительного заряда в центре нижней части грозового облака (большей частью отрицательно заряженной) вызывает вопросы у многих видных ученых. В частности,

нобелевский лауреат Р. Фейнман в своих лекциях по физике отмечал, что в разных исследованиях предложено достаточно много механизмов зарядки грозового облака, но до сих пор не выявлена главная причина генерации трипольной зарядовой структуры. Во-вторых, экспериментальное моделирование торнадо вызывает большие трудности вследствие высоких скоростей потока и разнообразия механизмов торнадообразования. Поэтому многие ученые (в том числе А. Пуанкаре) занимались теоретическим моделированием торнадо. Однако в большинстве статей и монографий исследовалась развитая стадия торнадо (после касания с подстилающей поверхностью воды или суши) с использованием гидродинамических и термогидродинамических подходов. Но в воронке торнадо и вблизи нее наблюдается высокая электрическая активность, которая проявляется частыми вспышками молний и разнообразными свечениями воронки или ее части. Поэтому для полноценного моделирования торнадо необходимо также учитывать электромагнитные факторы. В большинстве исследований недостаточно внимания уделяется изучению начальной стадии формирования воронки торнадо. Исследованию процесса опускания воронки смерча из материнского грозового облака на основе гидроэлектромагнитного подхода посвящена диссертация С.А. Маслова.

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы и 2 приложений. Полный объем диссертации составляет 214 страниц, включая 1 таблицу и 51 рисунок. Список литературы содержит 213 наименований.

Во **введении** обосновывается актуальность проводимых исследований, научная новизна полученных результатов, формулируется цель работы, перечисляются основные задачи и положения, выносимые на защиту, а также описываются методология и методы исследования.

В **первой главе** проводится краткий обзор основных гипотез и моделей торнадо, которые можно условно разделить на чисто гидродинамические, термогидродинамические и гидроэлектромагнитные. В моделях последнего типа учитывается, что электромагнитные факторы могут играть не

второстепенную, а часто основную роль в генерации смерча. В этой главе подчеркивается важность применения именно гидроэлектромагнитных гипотез и моделей для полноценного исследования смерчей.

Во-первых, некоторые важные черты поведения торнадо не удастся даже на качественном уровне объяснить без учета электромагнитных механизмов. Одной из таких черт является формирование каскада – своеобразного столба из капель, пены и брызг над морской поверхностью – при опускании воронки торнадо. В частности, А. Пуанкаре в своей гидродинамической модели смерча теоретически получил впадину на поверхности водоема под торцом воронки, но сам же подчеркнул, что это противоречит натурным данным. В более современных гидро- и термогидродинамических моделях также не было дано теоретического обоснования появления каскада часто еще до касания воронки с подстилающей поверхностью.

Во-вторых, с использованием энергетических оценок показано, что для генерации потоков с большими скоростями недостаточно учета только термогидродинамических механизмов. Также учитывается эмпирический факт, что под грозовыми облаками энергия сильных возмущений атмосферного электрического поля на порядки превышает энергию геомагнитного поля. Поэтому в диссертации для исследования начальной стадии процесса генерации воронки торнадо используется система уравнений электрогидродинамики.

Во второй главе на основе уравнений электрогидродинамики исследуется роль сильных возмущений атмосферного электрического поля под грозовым облаком в процессе формирования торнадо и струйных низовых прорывов тяжелой и заряженной газо-капельной среды облака. Учитывается, что возмущения электрического поля наряду с малоизвестным эффектом гигантской диэлектрической проницаемости (аналитически обоснованном в приложении Б) в облаке как суспензии микрокапель воды с зарядом тонкого двойного слоя приводят к понижению электрогидродинамического давления. Это благоприятствует генерации низовых прорывов из дипольных облаков и воронок торнадо из трипольных. Для аппроксимации возмущений

атмосферного электрического поля в разделе 2.1 предлагается существенно новая двухпараметрическая формула, в которой учитывается возможность сильного роста напряженности поля под облаком в сравнении с полем ясной погоды, а также изменения топологического вида при перезарядке облака с дипольного на трипольное. В разделах 2.2 – 2.5 система уравнений электрогидродинамики наряду с этой новой формулой используется для исследования начальной стадии низовых прорывов и торнадо.

В разделе 2.2 решена задача о течении воздуха и распределении напряженности электрического поля вблизи низового прорыва из дипольного грозового облака. При этом система уравнений разделяется на две подсистемы для гидродинамической и электрической функций тока, решение которых связано условием сохранения заряда на границе области прорыва, которое согласовывает нормальную составляющую тока проводимости и поверхностную дивергенцию конвективного тока. Численное моделирование показывает возможность роста напряженности электрического поля вблизи прорыва в несколько раз по сравнению с полем под центром дипольного облака, что объясняет высокую электрическую активность низовых прорывов, в том числе на начальной стадии.

В разделе 2.3 показано, что в зависимости от топологического вида возмущений атмосферного электрического поля под торнадо-циклоном формирующаяся из него воронка торнадо может сопровождаться появлением выступа в виде воротника в ее основании или каскада из капель, пены и брызг над морской поверхностью под торцом воронки. С целью обоснования появления каскада в разделе 2.4 получено аналитическое решение новой задачи об электрогидродинамической левитации сферической капли воды в ионизированном воздухе при наличии вертикального электрического поля. В решении предполагается малость числа Рейнольдса для поля скорости. Это возможно при достаточно малых размерах капли.

В разделе 2.5 на основе уравнений движения с учетом электрической силы исследовано вертикальное движение воронки торнадо под действием

возмущений атмосферного электрического поля, топологический вид которых аппроксимируется двухпараметрической формулой. Предполагается, что поле скоростей в торнадо-циклоне в начальный момент времени представляет собой Q-вихрь («сглаженный» вихрь Рэнкина), а электрические силы на начальной стадии формирования воронки вносят малую добавку к этому полю скоростей. С использованием следствий из теоремы Праудмена и линеаризации уравнений движения вблизи этого поля скоростей теоретически показано, что в зависимости от топологического вида возмущений электрического поля под грозовым облаком формирующаяся из него воронка может опускаться к подстилающей поверхности с дальнейшим образованием зрелого торнадо, зависать на некоторой высоте или втягиваться обратно в облако. Получен физически понятный результат: сила, действующая на положительно заряженную среду воронки, направлена по вектору напряженности электрического поля и пропорциональна его величине. Соискатель находит коэффициент пропорциональности.

Третья глава посвящена исследованию влияния возмущений атмосферного электрического поля под трипольным грозовым облаком и неоднородности распределения заряда в формирующейся воронке торнадо на усиление ее завихренности. Поскольку воронка образуется в центре нижней части торнадо-циклона, в средней, квазицилиндрической части воронки ядро заряжено положительно, а стенки – отрицательно. В разделе 3.1 отмечается, что такая зарядовая структура в формирующейся воронки в совокупности с геомагнитным полем создает в дополнение к силе Кориолиса азимутальную силу, закручивающую поток. А в разделах 3.2 – 3.3 на основе уравнений движения с учетом плавучести и электрической силы показано, что сильные возмущения атмосферного электрического поля приводят к усилению завихренности. При этом завихренность локализуется именно в тонких стенках воронки, толщина которых может быть на 1 – 2 порядка меньше радиуса торнадо. В этих разделах подчеркивается, что вклад электрических факторов в генерацию завихренности может превышать влияние термогидродинамических

механизмов.

В разделе 3.4 кратко описана неожиданная аналогия между системами уравнений электродинамики Максвелла с законом Ома и уравнениями турбулентного течения жидкости. На основе уравнений Рейнольдса для турбулентного движения исследовано влияние малых пульсаций скорости потока на усиление завихренности в зрелой стадии атмосферного вихря. С использованием метода вейвлет-анализа на конкретных примерах реальных торнадо и тайфунов показано, что вклад турбулентности в усиление завихренности может составлять более трети от влияния растяжения вихревых линий. Отмечается важность учета электрических факторов в исследовании «ураганных торнадо», часто возникающих на периферии тропических ураганов (тайфунов), и подчеркивается существенная роль гидратированных кластерных ионов в атмосфере в образовании торнадо и тайфунов.

В Приложении А подчеркивается, что наличие в атмосфере кластерных ионов вида $(\text{H}_3\text{O})^+(\text{H}_2\text{O})_m$ и $(\text{OH})^-(\text{H}_2\text{O})_n$ оказывает влияние на возможность очень быстрого (за 5 – 10 минут) формирования торнадо-циклонов за счет восходящих дегазационных смерч-вихрей, как 20 сентября 1997 г. вблизи Владивостока. Также кластерные ионы играют важную роль в формировании двойного электрического слоя на поверхности облачных микрокапель.

В Приложении Б показано, что наличие тонкого двойного слоя у облачных микрокапель может приводить к появлению эффекта гигантской диэлектрической проницаемости в грозовом облаке. С целью исследования этого эффекта решена задача об электрокапиллярном движении суспензии проводящих жидких капель с двойным слоем. Эта система получена из задачи В.Г. Левича об электрокапиллярном дрейфе одиночной капли путем осреднения по ансамблю всех возможных конфигураций капель. В ходе исследования учитывается, что в результате дрейфа капель разноименно заряженные обкладки двойного слоя приходят в движение, что приводит к появлению собственного магнитного поля и генерации электровихревого течения. В Приложении Б аналитически показано, что для однородной суспензии капель

именно с тонким двойным слоем возможен неожиданный эффект гигантской диэлектрической проницаемости.

Результаты диссертации являются достоверными, так как использовались классические математические методы механики сплошных сред и апробированные в работах других авторов численные методы. Результаты диссертационной работы качественно и количественно согласуются с визуальными и экспериментальными данными натурных наблюдений. Все декларированные в диссертации результаты являются новыми. Основные результаты диссертации в полной мере отражены в 19 научных статьях, 8 из которых опубликованы в изданиях, индексируемых в Web of Science, Scopus и/или RSCI.

Диссертация написана ясным и доступным языком. Представленные результаты и их недостатки кратко можно изложить следующим образом.

1. Новая двухпараметрическая формула, предложенная в диссертации, адекватно описывает изменение величины и топологического вида возмущений напряженности атмосферного электрического поля под грозовым облаком, в том числе при перезарядке облака с дипольного на трипольное. Однако проверка этого положения в диссертации не приведена.

2. Постановка задачи о движении низового прорыва формулируется в терминах трех функций: гидродинамической функции тока, потенциала электрического поля и электрической функции тока. Вместо этого предлагается отдельно поставить задачу для гидродинамического потенциала обтекания параболоида, которая имеет простое точное решение, а потом подставить это решение в задачу о распределении потенциала электрического поля. Таким образом, задача сводится к краевой задаче только для потенциала электрического поля, решение которой получить значительно проще.

3. Задача о левитации капли решена в приближении Стокса, использование которого предполагает малость числа Рейнольдса. Это должно дать ограничение на размер капли, оценку которого следовало бы привести в диссертации.

4. Силу сопротивления, действующую на каплю, удобнее вычислять методом, изложенным в учебнике Л.И. Седова «Механика сплошной среды. Том 2»: интеграл по поверхности капли сводится к интегрированию асимптотического выражения для компонент тензора напряжений по бесконечно удаленной плоскости.

5. В диссертации показано, что в сильных электрических полях капли с поверхности моря могут втягиваться в область под торцом опускающейся воронки, образуя при этом каскад. Для капли с двойным электрическим слоем получена зависимость напряженности поля, необходимой для динамического зависания (левитации), от плотности заряда двойного слоя, которая в диссертации не определяется. Однако можно заметить, что кривая зависимости поля от плотности заряда имеет минимум, в окрестности которого она мало меняется. Соискателю желательно найти соответствующий диапазон изменения плотности заряда двойного слоя и сделать оценку ее величины.

6. В работе показано, что сильные возмущения электрического поля под грозовым облаком наряду с радиальным перепадом плотности заряда приводят к интенсификации завихренности именно в стенках смерча. Этот результат проще пояснить, если уравнение для производной вертикальной компоненты завихренности умножить на эту компоненту. Тогда будет видно, что производная квадрата вертикальной завихренности по времени положительна.

Высказанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует заявленной специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1 – 2.5 Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В.

Ломоносова. Работа оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, автор диссертации, Маслов Сергей Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,

главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Лаборатория механики систем

Петров Александр Георгиевич

«26» ноября 2024 г.

Контактные данные:

тел.: ; e-mail:

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
01.02.05. – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Адрес места работы: 119526 Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

Подпись главного научного сотрудника ИПМех РАН

А.Г. Петрова удостоверяю:

Ученый секретарь ИПМех РАН

к. ф.-м. н.

26.11.2024 г.



Котов М.А.