

Кое-что о смерчах

М. Б. ГОЛУБЕВ

Введение

Смерч или торнадо – удивительное, очень красивое, в сильной степени разрушительное и в то же время крайне малоизученное явление природы. Все, кроме некоторых ученых, знают, почему он вертится. Любой мало-мальски образованный человек знает, что воронки и смерчи закручиваются под влиянием силы Кориолиса. Попробуйте провести опрос ваших знакомых: «Всегда ли воронка в вашей ванне закручивается в одну сторону?». 99 % опрошенных будут настаивать на том, что в его ванне воронка всегда закручивается в одну сторону. На вопрос: «В какую?» большинство уже не столь уверенно ответит: «По часовой стрелке». (К слову сказать, в нашем северном полушарии сила Кориолиса должна закручивать воронку против часовой стрелки.) И, наконец, вопрос: «А что такое сила Кориолиса?» может и вовсе привести вашего собеседника в замешательство.

Все знают ответ, но этот ответ вызывает серьезные сомнения. Поскольку вина Кориолиса не доказана, некоторые из ученых продолжают осторожный поиск причин этого загадочного явления.

Вопрос настолько сложен, что в курсе теоретической физики Ландау, в котором приведены решения практически всех задач, которые можно решить без применения компьютера, нет даже упоминания ни о воронках, ни о смерчах.

И все-таки, что такое сила Кориолиса? По законам Ньютона тело движется равномерно и прямолинейно, если на него не действуют силы. Но если мы наблюдаем за таким телом из вращающейся системы отсчета (с карусели), то его движение не будет ни равномерным, ни прямолинейным. Таким образом, во вращающейся системе отсчета мы не можем пользоваться законами Ньютона. Это неудобно. Но неудобство можно устранить, если ввести две дополнительные силы, которые как бы действуют на тело: центробежную силу и силу Кориолиса. Теперь законы Ньютона снова можно применять, но учитывая эти две фиктивные силы.

Земля вращается, поэтому, например, биатлонист, стреляющий по мишени, должен делать поправки не только на ветер, силу тяжести и сопротивление воздуха, но и на силу Кориолиса, поскольку за время полета пули мишень сме-

стится. Это смещение можно отнести к вращению Земли или к силе Кориолиса, что одно и то же, в любом случае оно настолько мало, что для биатлониста его как бы и нет.

Лучше говорить не о силе Кориолиса, а о законе сохранения момента импульса. Тем более, что когда говорят о силе Кориолиса, как о причине образования воронки, имеют в виду именно закон сохранения момента импульса. Точную формулировку этого закона можно прочитать в учебнике, а мы поясним его действие на примере.

Фигуристка в ледовом дворце, вращаясь на кончиках коньков, ускоряет свое вращение, приближая руки к корпусу. И наоборот, когда она разводит руки, вращение замедляется. Она использует закон сохранения момента импульса, хотя, может быть, и не подозревает об этом. Усложним картинку. Пусть фигуристка выполняет свою как угодно сложную программу не просто на ледовом стадионе, а на залитой льдом карусели, которая может свободно вращаться (например, на магнитной подушке). На каждое движение фигуристки карусель будет отвечать соответствующим вращением. Если фигуристка начнет вращаться в центре карусели, карусель будет вращаться в противоположном направлении. Если фигуристка будет вращаться не в центре карусели, карусель также будет вращаться в противоположном направлении. Если фигуристка начнет нарезать круги по краю карусели, карусель снова ответит вращением в противоположном направлении. Если программа движений достаточно сложна, то рассчитать угловую скорость карусели в каждый момент времени тоже не простая задача. Однако можно с уверенностью утверждать, что как только фигуристка закончит свою программу и остановится, карусель остановится вместе с ней. Это следует из закона сохранения момента импульса. Правда, существует еще и сопротивление воздуха. Так что, когда фигуристка остановит свое движение относительно карусели, то карусель вместе с фигуристкой будет продолжать слабое вращение. При этом в воздухе останется слабый круговой ветерок противоположного направления. Но, если устранить сопротивление воздуха, поместив фигуристку вместе с каруселью и магнитной подушкой в вакуум, то карусель точно остано-

вится вместе с фигуристкой. Так работает закон сохранения момента импульса.

Никакая замкнутая система не может раскрутиться за счет внутренних процессов – это требует закон сохранения момента импульса. Если убрать с карусели лед и фигуристку, и поставить метателя молота, то, когда метатель молота раскрутится, бросит молот и остановится, карусель будет продолжать вращаться вместе с метателем молота. Но если же что-то испугает его, и он остановится, не бросив молот, карусель остановится вместе с ним.

Также, по общепринятым представлениям, воронка в ванне образуется от того, что ванна вращается вместе с планетой, и когда потоки воды движутся к единому центру, вращение ускоряется – точно также, как в случае с фигуристкой, когда она сводит руки ближе к корпусу. То есть в силу закона сохранения момента импульса, или под влиянием силы Кориолиса. При этом мало кто знает, что в нормальной ванне сила Кориолиса, связанная с вращением Земли, не может создать воронку диаметром более десяти микрон.

О смерчах, воронках и кое-что еще

Смерч и воронка в ванне – явления, имеющие общую физическую природу. По этой причине они очень похожи, если бы не «хобот». «Хобот» смерча еще называют воронкой. Ничего общего с воронкой «хобот» не имеет. Именно наличие у смерча «хобота» маскирует настоящую схожесть между смерчем и воронкой. Очень интересен вопрос, как и почему возникает «хобот» и какова структура течений воздуха внутри и вокруг «хобота». Мы поговорим об этом несколько позже, отметим только, что «хобот» возникает не всегда или, по крайней мере, не сразу, а только тогда, когда смерч набирает большую мощь. А еще, значения скоростей потоков воздуха в районе «хобота» можно получить, измерив температуру, влажность и давление воздуха на безопасном расстоянии от смерча. При этом не нужно рисковать жизнью и жертвовать огромным количеством дорогостоящих приборов, как это делали охотники за торнадо в фильме «Охотники за торнадо».

Теперь о том, что говорят многолетние наблюдения о процессе возникновения смерча.

Обычно смерч возникает из быстрорастущего облака, которое еще называют «материнским». Это облако развивается «взрывным» образом – за 20–30 мин его высота удваивается. Такое «взрывное» развитие говорит о мощных восходящих

потоках влажного теплого воздуха внутри облака. Восходящий поток настолько мощный, что вершина «материнского» облака пробивается в стратосферу на 2–4 км. А ведь в стратосфере температура воздуха растет с высотой, в отличие от тропосферы – нижнего слоя атмосферы. По этой причине стратосфера очень устойчива (легкий теплый воздух над тяжелым холодным), и для восходящих потоков она представляет собой стену, которую очень трудно пробить. Например, восходящие потоки в грозовой ячейке упираются в стратосферу и растекаются в стороны, образуя так называемую «наковальню» – плоскую вершину грозовой ячейки. По-видимому, восходящие потоки в обычной грозовой ячейке не так сильны, как в «материнском» облаке смерча. В ураганах же, наоборот, восходящие потоки еще сильнее. В знаменитом урагане «Катрин», который погубил Новый Орлеан, восходящие потоки достигали высоты 23 км, т. е. на 7 км пробивали стратосферу (в районе экватора стратосфера начинается на высоте около 16 км, в наших умеренных широтах – 10–12 км).

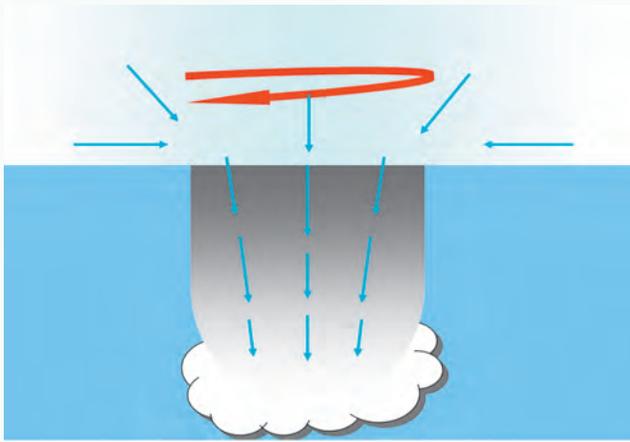
А сейчас поговорим о смерчах и воронках. Зная, что возникновению смерча предшествует образование мощных восходящих потоков, мы можем легко увидеть, что смерч и воронка в ванне имеют одинаковую физическую природу.

Для этого достаточно перевернуть картинку или встать на голову.

Картинка выглядит так, будто кто-то открыл в небе невидимую пробку, и в образовавшееся отверстие устремился теплый воздух, точно как вода в ванне. Отличие в том, что над воронкой в ванне нет «хобота».

Это простое наблюдение позволяет говорить о воронках и смерчах как о явлениях одной природы. А, значит, исследование воронок и понимание причин их образования позволит нам судить о причинах образования смерчей. Конечно, эта картинка совершенно не похожа на то, что нам показывает канал Discovery. Там от именитых ученых мы узнаем, что торнадо возникает в результате взаимодействия холодных фронтов, пришедших из Канады, и теплых – из Мексиканского залива. Но какой же разумный человек верит тому, что ему показывают по телевизору?

Следует отметить, что существуют и другие явления, связанные с возникновением спонтанного вращения потока и, по-видимому, происходящие по той же физической причине. Одно из них связано со всплыванием пузырьков. В 1960-х гг. академик Лаврентьев в журнале «Наука и жизнь»



опубликовал небольшой список простых, интересных, но не решенных задач. Среди прочих был вопрос: почему мелкие пузырьки в воде всплывают по спирали. По уровню сложности академик Лаврентьев оценил эту задачу как диссертацию на степень кандидата физико-математических наук. Судя по тому, что задача до сих пор не решена, можно поднять планку до уровня докторской диссертации, а, может быть, и выше.

Еще одно схожее явление связано с потоком газа из сопла реактивного двигателя. Хорошо известен факт, что спектр звука, издаваемого реактивным двигателем, помимо белого шума, содержит некий основной тон, превышающий по амплитуде все остальные частоты, который еще называют скрич-тоном. По свидетельству знаменитого пианиста Дениса Мацуева, для двигателей лайнера А-320 при нормальной посадке этот тон – фа-диез второй октавы. Если этот тон ми – то посадка проходит в нештатном режиме. Природой этого скрич-тона заинтересовалась группа российских ученых, и в 2008 г. в журнале «Доклады академии наук» появилась статья, которая содержала описание расчета сверхзвукового вытекания газа из сопла реактивного двигателя. Из расчета следовало, что сверхзвуковой поток закручивается в спираль. Именно из-за этого спирального движения в звуковом спектре появляется скрич-тон. Следует отметить, что для этого сложнейшего расчета понадобился самый мощный в России на тот момент суперкомпьютер «Ломоносов», расположенный в Московском университете. Поскольку в расчетах не учитывалось вращение Земли, можно с уверенностью сказать, что в закручивании сверхзвуковой реактивной струи Кориолис не виноват.

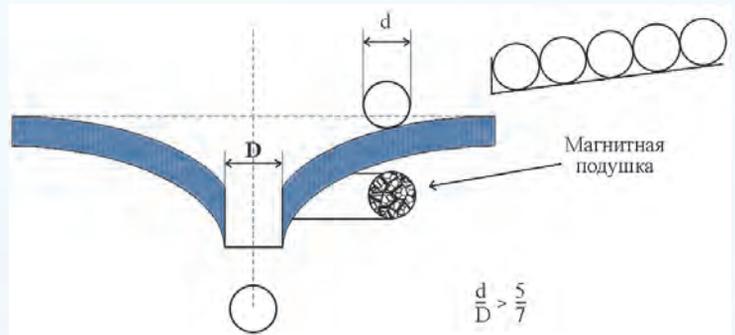
Существуют и механические аналоги воронок. Например, если скатывать шарик по наклонной цилиндрической трубе, то он может двигаться по прямой вдоль образующей цилиндра. Но малейшее отклонение от этой траектории приведет к раскачиванию шарика из стороны в сторону, а затем и к вращению по спирали.

Другой, более интересный пример, связан с механизмом, похожим на рулетку в казино. Рулетка должна быть гладкой, с отверстием в центре и способной свободно (без трения) вращаться. Для этого можно использовать ту же магнитную подушку, что и в случае с фигуристкой.

Если скатывать шарики от механической мышки (чтобы не было проскальзывания) от края рулетки к отверстию по радиальной образующей, то малейшее отклонение любого из шариков от радиальной траектории приведет к самопроизвольному раскручиванию рулетки. Для этого достаточно, чтобы диаметр шариков был больше, чем $5/7$ от диаметра отверстия. При этом траектории следующих скатываемых шариков начнут закручиваться в спираль.

Школьники-экспериментаторы

Группа школьников из лицеев и гимназии г. Сарова под руководством известного ученого Е. Е. Мешкова на протяжении нескольких лет проводила исследования процесса образования воронки при вытекании воды из сосудов различной формы и объема. В первых очень простых экспериментах школьники использовали цилиндрическую ванну диаметром 29 см и высотой 25 см, с отверстием диаметром 1,6 см в центре днища, которое снизу закрывалось резиновой пробкой. При таком диаметре отверстия образование воронки происходило почти всегда. Школьники хотели убедиться, что воронка всегда закручивается в одну сторону, и... не убедились. Точнее, убедились в обратном. Воронка равновероятно закручивалась как по, так и против часовой стрелки.



Очень быстро стало понятно – направление закручивания зависит от направления вращения остаточных (малозаметных) возмущений, что вовсе не связано с силой Кориолиса. А поскольку остаточные возмущения носили случайный характер, воронка приблизительно равновероятно закручивалась в обе стороны.

Конечно, пыливый читатель может сказать: «Вот если бы подождать часов десять или больше, пока затухнут все возмущения, кроме того, которое связано с силой Кориолиса, то воронка закручивалась бы только против часовой стрелки». Согласен. Но с одной оговоркой: при таком малом возмущении воронка в нашей ванне не возникла бы совсем. Сам факт, что малозаметные возмущения влияют на образование воронки сильнее, чем сила Кориолиса, говорит о том, что Кориолис ни в чем не виноват.

Идея о силе Кориолиса как о причине возникновения воронки настолько популярна, что среди школьников (и не только) ходит такая легенда: если поставить ванну в метре с севера от экватора, то воронка закрутится в одну сторону, если в метре к югу – в другую. Интересно, что эта легенда имеет свое воплощение. В Республике Эквадор для туристов организован аттракцион: на мощеной площадке проведена линия экватора, и туристам, пересекающим эту линию, за определенную плату выдают сертификат о пересечении экватора. Вместе с тем в ста метрах к югу от этой площадки находится небольшая альтернативная площадка с альтернативным экватором. Рядом стоит человек, который утверждает, что именно его экватор – истинный и тоже продает сертификаты. Для доказательства истинности своего экватора он использует небольшую ванну, которую переносит с одной стороны белой линии на другую и демонстрирует воронки, закручивающиеся в противоположные стороны якобы под действием противоположных направлений силы Кориолиса. Человек этот, безусловно, мошенник, наживающийся на трудностях науки.

Процесс образования воронки напоминает ситуацию, когда монета стоит на ребре. Такое положение монеты неустойчиво. Можно задать вопрос: когда и в какую сторону она упадет? Ответ на этот вопрос не всегда относится к физике. Например, монета упадет, когда под окном пройдет трамвай, или когда простуженный лаборант зайдет в кашле. А вот сам процесс падения определяется законами физики и может быть достаточно точно рассчитан. Примерно то же наблюдалось в экспериментах школьников.

Время зарождения воронки (образование лунки на поверхности воды) варьировалось в широких пределах от десяти до пятидесяти секунд, а время развития (время, за которое воздушное ядро воронки достигает отверстия) от 8 до 15 с. Из этого можно сделать вывод, что начало образования воронки явление случайное, зависящее от остаточных течений. Эти течения, в свою очередь, зависят от внешних факторов: как наполняли ванну, и сколько времени прошло после наполнения. А вот развитие воронки определяется физическими законами, которые пока малоизучены. То есть невращающийся поток неустойчив, как монета на ребре. На эту мысль навело интересное явление, которое наблюдалось в одном из экспериментов. В самом конце эксперимента, когда воды в ванне оставалось не более одного сантиметра, на поверхности воды сформировалась загадочная картинка из стоячих спиральных волн.

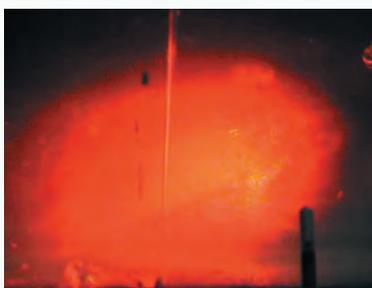
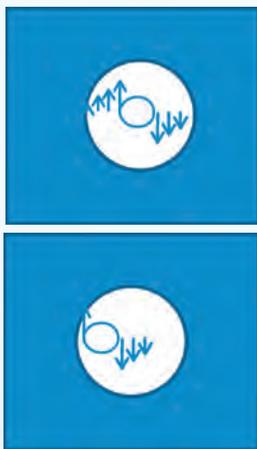
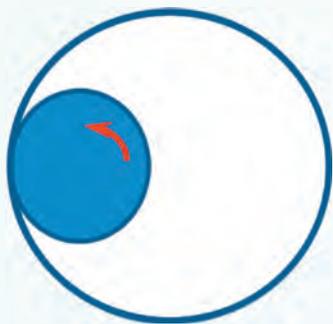
Позже выяснилось (не без помощи научных руководителей), что школьники наблюдали давно известное и хорошо забытое явление. В 1962 г. была опубликована статья, в которой исследовалась устойчивость цилиндрически симметричных потоков. Оказалось, что в цилиндрически симметричных потоках возникают экспоненциально нарастающие спиральные возмущения. Их и наблюдали школьники. В этой статье спиральные возмущения не связывали с воронкой, но, видимо, именно они раскручивают воронку. На это указывают и другие эксперименты, в которых пристальное внимание стали обращать на форму воронки.

Получается, что воронку раскручивает вовсе не сила Кориолиса, а спонтанно возникающие спиральные возмущения. А не противоречит ли это утверждение закону сохранения момента

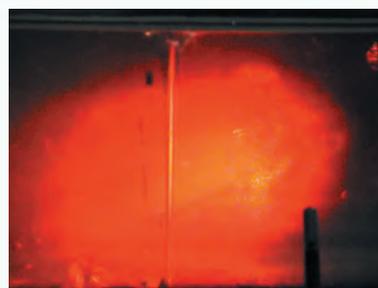


импульса? Законы физики, в отличие от юридических законов, не предполагают никаких санкций за их нарушение. Вы никогда не услышите, что явление было строго запрещено на десять лет за нарушение законов физики. Их просто невозможно нарушить. Чтобы ответить на этот вопрос, нужно понять: в какую сторону воронка вращается на самом деле? На некоторые мысли по этому поводу наводит следующая картинка.

В какую сторону вращается цилиндр внутри трубы? Как целое он вращается по часовой стрелке. Но вокруг своей оси – против. Можно сказать, что цилиндр вращается во все стороны. То есть некоторые части цилиндра вращаются в одну сторону, а некоторые – в другую. При таком вращении момент импульса может быть каким угодно и даже равным нулю, если радиус цилиндра равен двум третям радиуса трубы. Вращение есть, а момент импульса равен нулю! В примере с фигуристкой, если она, например, движется по кругу, то карусель вращается в противоположную сторону, и суммарный момент импульса равен нулю. Но оказывается, если она будет описывать сложные пируэты (такие, как на картинке), то карусель будет покоиться, хотя фигуристка вращается. Более того, фигуристка может двигаться по краю

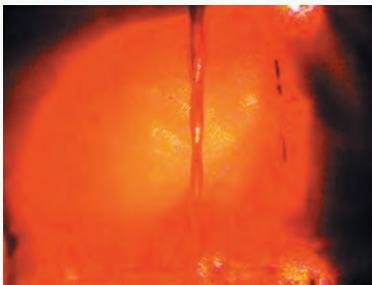


4 с

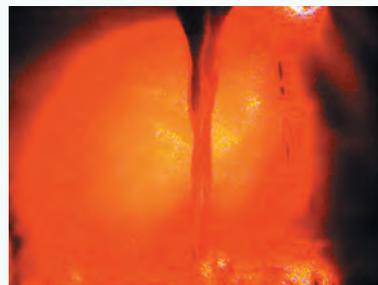


14 с

Гладкая воронка не растет



4 с



21 с

Спиральные возмущения усиливают вращение и увеличивают диаметр воронки

карусели, и вращаться так, что и карусель, и она будут перемещаться по часовой стрелке (или против). И все же, как только она остановится, карусель остановится вместе с ней. То же и со спиралью. Вращение потоков в спирали, по видимому, имеет сложный характер, похожий на картинку с цилиндром в трубе, при этом полный момент импульса может не соответствовать видимому вращению. Уходящий в отверстие поток вращается в сторону, противоположную той, в которую вращается воронка. Точнее сказать, уносит момент противоположного знака. Куда он вращается – невозможно разглядеть даже вооруженным глазом.

Так, например, в другом эксперименте было отмечено, что острие воздушного ядра воронки находится не в центре отверстия, а медленно прецессирует возле его края.

Если бы острие находилось в центре отверстия, то можно было бы сказать, что вытекающая вода вращается в том же направлении, что и вода в воронке. Это показано на левой схеме, где уходящий поток вращается по часовой стрелке. А на схеме справа, уходящий поток вращается, скорее, против часовой стрелки. Вытекающая струя на картинке как будто вращается, но найти простой способ для определения направления этого вращения или измерения момента импульса не удалось.

«Хобот» и «смерч-призрак»

Что такое «хобот» смерча? «Хобот» – это некое туманное образование в форме воронки, «опускающееся» из «материнского» облака.

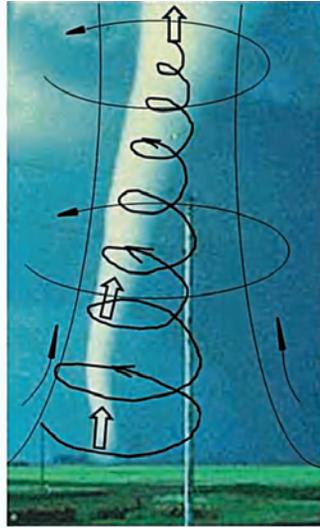
Что может «опускаться» в мощном восходящем потоке? Чтобы ответить на этот вопрос, давайте разберемся, что происходит с воздухом. По закону Бернулли давление в стационарном потоке несжимаемой жидкости падает с ростом скорости и высоты. Или, точнее, сумма кинетической, потенциальной энергий и давления постоянна. Нечто подобное происходит и с воздухом. Хотя потоки в смерче не совсем стационарны и воздух не является несжимаемой жидкостью, давление в потоке падает с возрастанием скорости и высоты по закону, схожему с законом Бернулли. Но, в отличие от несжимаемой жидкости, при уменьшении давления воздух расширяется, а, значит, охлаждается. При достаточно сильном охлаждении водяной пар, содержащийся в воздухе, конденсируется, образуя туман. Но в отличие от обычного, малоподвижного тумана, этот туман динамический. Образовавшиеся капельки воды со скоростями в десятки метров в секунду уносятся вверх к «материнскому» облаку, а на их месте возникают новые капельки. Можно сказать, что туман этот образуется, когда поток достигает некоторой критической скорости. При этом значении скорости расширение, а, значит, и охлаждение воздуха достаточны для образования тумана.

Таким образом, если вы видите опускающийся из облака «хобот» смерча, то это означает, что восходящие потоки усиливаются. И наоборот, уходящий в облако «хобот» говорит об ослаблении восходящих потоков.

Значение критической скорости зависит от температуры, атмосферного давления и, главное, влажности. Предположим, вы наблюдаете смерч, «хобот» которого уже «опустился» и касается поверхности земли. При этом температура воздуха 25°C и давление равно одной атмосфере. Каковы скорости потоков воздуха? Если влажность 98 %, то скорость потока на границе «хобота» 30 м/с. Если влажность 95 %, то скорость 50 м/с. Если же влажность 80 %, то скорость 95 м/с. При такой скорости поток может поднять человека и унести в «материнское» облако. Следует понимать, что восходящие потоки вовсе не сосредоточены в «хоботе». Вокруг «хобота» они тоже присутствуют, но скорость их не достигла критической, например, 80 м/с вместо 95. Этого хватит,

чтобы вырвать дерево с корнем. Более того, потоки могут вовсе не достигать критической скорости, например, из-за малого значения влажности. В этом случае «хобот» не образуется, и мы имеем «смерч-призрак». Такие смерчи наиболее опасны, поскольку не предупреждают о своем приближении, и даже после их прохождения непонятно, что случилось. Просто, в одном дворе все деревья вырваны с корнем, а в соседних – не тронуты даже листья на деревьях. Такое явление наблюдалось в Москве 17 июля 2004 г.

Примерно такая картина потоков соответствует смерчу. И примерно так бесчинствует «смерч-призрак», срывая крышу с «понравившегося» ему дома.



А эти картинки позволяют судить об эволюции смерча. С первого взгляда здесь два смерча сливаются в один, но это не так. На самом деле мы видим один смерч и те же спирали, что видели в воронках. Просто, в спиральях критическая скорость достигается раньше, чем в середине потока. Знаменитый Фуджито, автор шкалы Фуджито для классификации силы торнадо, говорил о наблюдении восьми воронок в одном торнадо. На самом деле это никакие не отдельные воронки, а один смерч, который раскручивается восьмизаходной спиралью.

Помимо закона сохранения момента, с которым мы разобрались, существует еще одно препятствие на пути создания физической модели воронок и смерчей. Это препятствие – теорема Кельвина, или теорема о сохранении циркуляций. Формулируется эта теорема очень просто. Возьмем внутри потока жидкости произвольный замкнутый контур, например, окружность, и пусть этот контур свободно течет вместе с жидкостью. Если в каждой точке взять проекцию скорости на линию контура, и просуммировать эти проекции по всему контуру, то это и есть циркуляция. Теорема Кельвина гласит – в процессе



в свое время возникли биофизика, геофизика. Создавать такую науку придется будущему поколению ученых – нынешним школьникам, и назвать ее можно просто – топфизика.

Закключение

Итак, мы знаем причину возникновения воронок и смерчей. Это вовсе не сила Кориолиса, а спиральные неустойчивости. Достаточно ли этого знания? Конечно, недостаточно. Монета на ребре, падая из неустойчивого состояния, переходит в одно из двух устойчивых – орел или решка. Сколько таких устойчивых состояний у воронки? Ведь при одних и тех же высоте уровня воды и диаметре отверстия в ванне возникают воронки разного диаметра и интенсивности. Может быть, диаметр воронки (или сила смерча) зависит от числа заходов спирали, и он разный для одинарной, двойной или тройной спирали. Мы не можем сказать, какой силы торнадо возникнет при известных погодных условиях, может ли он вообще возникнуть, и куда он будет двигаться.

На эти вопросы мы ответить не можем, а значит, не знаем как предотвратить образование воронок и смерчей. А это очень важно. Например, 24-тонный бензовоз с помощью дорогостоящего насоса сливает почти все горючее за 16 мин. Из-за образования воронки последние 400 л сливаются еще 4 мин, при этом насос работает в нештатном режиме и быстро выходит из строя. В нефтяной промышленности образование воронок – бич для многих производственных процессов. У гидроэлектростанции воронка может отбирать более половины энергии, а, значит, если бы уметь предотвращать образование воронки, то не нужно было бы затапливать деревни и посевные площади.

И когда мы достигнем понимания механизма смерча на уровне простых соотношений наподобие уравнений Бернулли, мы сможем предотвращать его появление, или хотя бы направлять его по безопасной траектории. Возможно, это будем уже не мы, а нынешние школьники.

течения циркуляция не изменяется. Даже если в процессе течения контур завяжется сложнейшим морским узлом, развязать который не под силу средней руки моряку, циркуляция по этому контуру окажется прежней, например, нулем.

Получается, что если в нашей ванне в начальный момент вода покоится, то все циркуляции по любому контуру равны нулю. Из этого следует, что они будут равны нулю и в любой другой момент времени, а, значит, вода будет вытекать без образования воронки. Это следует из теоремы Кельвина. Но теорема – это не закон физики. Из теорем бывают исключения. Что, если контур не завяжется узлом, а расслоится, как чайный гриб, и распадется на два контура. В неустойчивых течениях такие ситуации возможны. Но такими ситуациями занимается уже не физика, а другая наука – топология.

Топология достаточно далекая от физики наука, как и физика от топологии. Когда известному физику И. С. Шапиро понадобилось знание топологии для разрешения некоторых вопросов в теории элементарных частиц, его интерес привел к появлению курса «Топология для физиков» в МИФИ. Первую лекцию Иосиф Соломонович начал словами: «Когда я открыл учебник по топологии, у меня сложилось впечатление, что я пытаюсь прочесть партитуру симфонического оркестра». Не каждый физик умеет читать партитуры симфонического оркестра.

Однако топология все больше проникает в физику, правда, пока, в основном, в физику элементарных частиц. Возможно, назрела необходимость возникновения новой науки, объединяющей методы физики и топологии, ведь на стыке наук возникают открытия. Так на стыке наук

ГОЛУБЕВ Михаил Борисович – старший научный сотрудник отдела фундаментальных исследований ИТМФ РЯЦ-ВНИИЭФ