

Исследован процесс формирования всплеска при столкновении твердого тела с жидкостью

5.03.09 | [Физика](#), [Юрий Ерин](#)

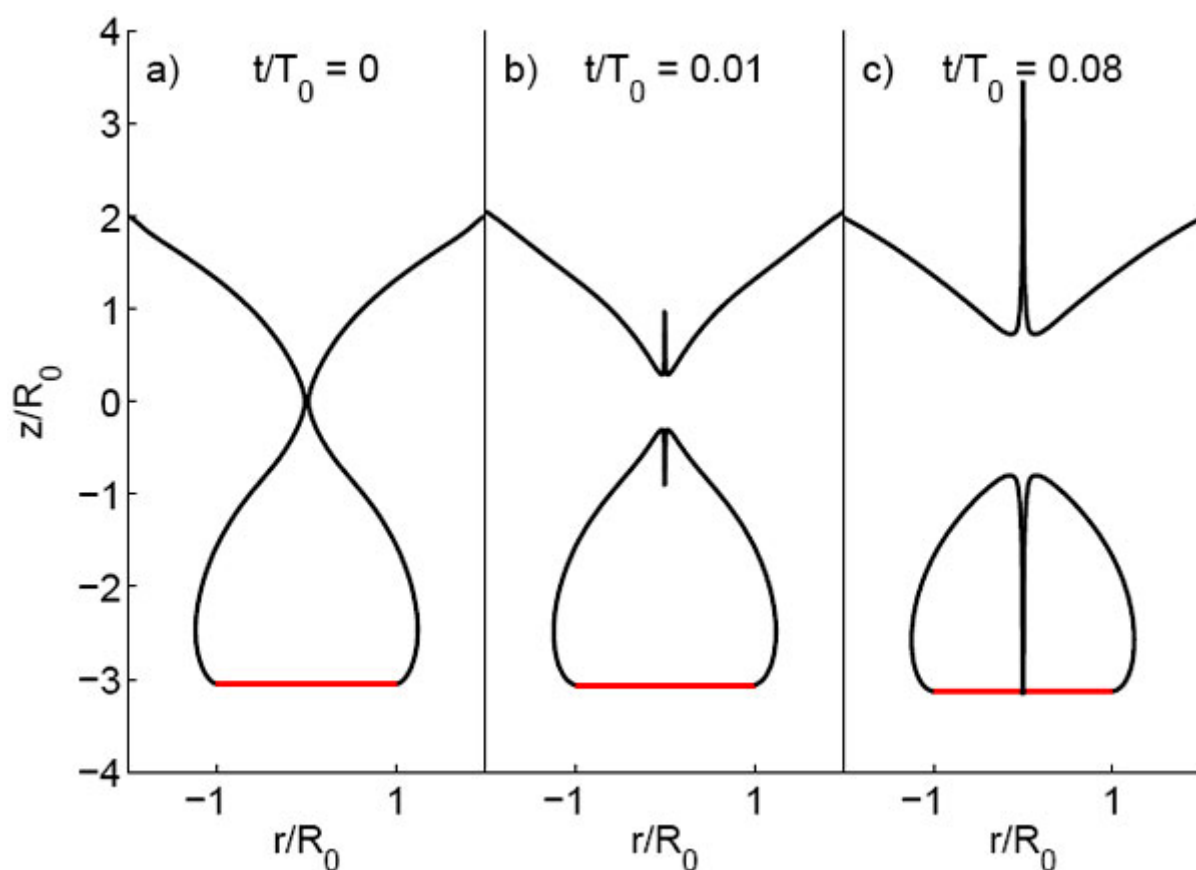


Рис. 1. Результат численного моделирования: эволюция формы свободной поверхности жидкости в точке отсечки (а) в момент начала формирования всплесков (b) и в момент, когда нижняя струя ударяется о диск, показанный *красной линией* (с). Отсчет координаты z и времени t ведется от точки отсечки. Координата и время нормируются на некоторые величины (см. ниже пояснения в тексте). Рис. из обсуждаемой статьи в *Phys. Rev. Lett.*

При падении диска в воду возникает воздушная полость, которая, схлопываясь, приводит к образованию всплеска. Используя высокоскоростную камеру и численное моделирование, голландские и испанские физики показали, что общепринятая теория формирования всплеска плохо объясняет наблюдаемое явление, и предложили свою модель данного эффекта.

Наиболее заметное явление при падении твердого тела в воду — это образование всплеска — тонкой струи, направленной вертикально вверх. Последовательность событий, приводящих к этому эффекту, была описана более ста лет назад Артуром Уорthingтоном ([Arthur Mason Worthington](#)): после столкновения с жидкой средой твердое тело образует в ней полость, которая, благодаря гидростатическому давлению, начинает схлопываться, что приводит к образованию и отсечке воздушного пузыря. Далее из точки, где воздушная полость отсекается (в дальнейшем эту точку будем именовать «точкой отсечки»), выбрасываются две очень тонкие струи — одна направлена вертикально вверх, другая вниз.

Точка отсечки представляет собой так называемую конечно-временную сингулярность — локальную расходимость (очень большое изменение) амплитуды или градиента какой-либо физической величины за конечное время. В последние годы конечно-временная сингулярность очень активно изучается в гидродинамике. Энергия жидкости, движущейся в окрестности такой сингулярности, как бы концентрируется в точке отсечки, в результате чего и создаются упомянутые выше всплески, или струи Уортингтона.

Кстати, заметим, что такая конечно-временная сингулярность проявляется не только при исследовании динамических явлений в жидкости, но и в механике; яркий пример — диск Эйлера ([Euler's disk](#)). Это круглый диск, который одновременно совершает качение и вращение на горизонтальной плоскости; при этом в конце его движения возникает две особенности: резкое увеличение частоты звука, идущего от контакта диска с поверхностью, и последующая внезапная остановка движения. Эта внезапная остановка и есть конечно-временная сингулярность (см. об этом, например: [Euler's disk and its finite-time singularity](#) // *Nature*. 2000. V. 404. P. 833–834). С точки зрения физики происходит бесконечно большое возрастание угловой скорости вращения диска за конечное время. Между прочим, обычную монету можно рассматривать как диск Эйлера, а ее «дрожание» на конечной стадии ее движения можно считать конечно-временной сингулярностью. (Просто [изобретатель](#) коммерческой игрушки «диск Эйлера» Джозеф Бендик оптимизировал выбор диска и поверхности таким образом, что время, необходимое для остановки диска, выходит за пределы 60 секунд.)

В своей [недавней публикации](#) в журнале *Physical Review Letters* (доступной также в виде [препринта](#)) голландские и испанские исследователи утверждают, что радиальная фокусировка энергии течения жидкости в точке отсечки (в сингулярности) не объясняет в полной мере экстремально малую толщину всплесков, возникающих при столкновении твердого тела с поверхностью жидкости. Они показали, что формирование струи Уортингтона можно объяснить не течением жидкости вблизи конечно-временной сингулярности, а рассматривая процесс столкновения стенок воздушной полости целиком — от начала её образования и вплоть до исчезновения.

Физики наблюдали падение диска радиусом $R_0 = 2$ см на поверхность воды со скоростью $V_0 = 1$ м/с. Числа Рейнольдса и Вебера (см. ниже) составляли довольно большие значения, так что эффектами вязкости воды и ее поверхностным натяжением при падении диска в воду можно пренебречь. Единственным контролирующим параметром в эксперименте было число Фруда (см. ниже), равное 5,1.

[Число Рейнольдса](#) (обозначается Re) определяет характер потока жидкости или газа — ламинарный или турбулентный. Эта безразмерная величина равна произведению скорости течения, диаметра трубы и плотности жидкости, деленному на ее вязкость

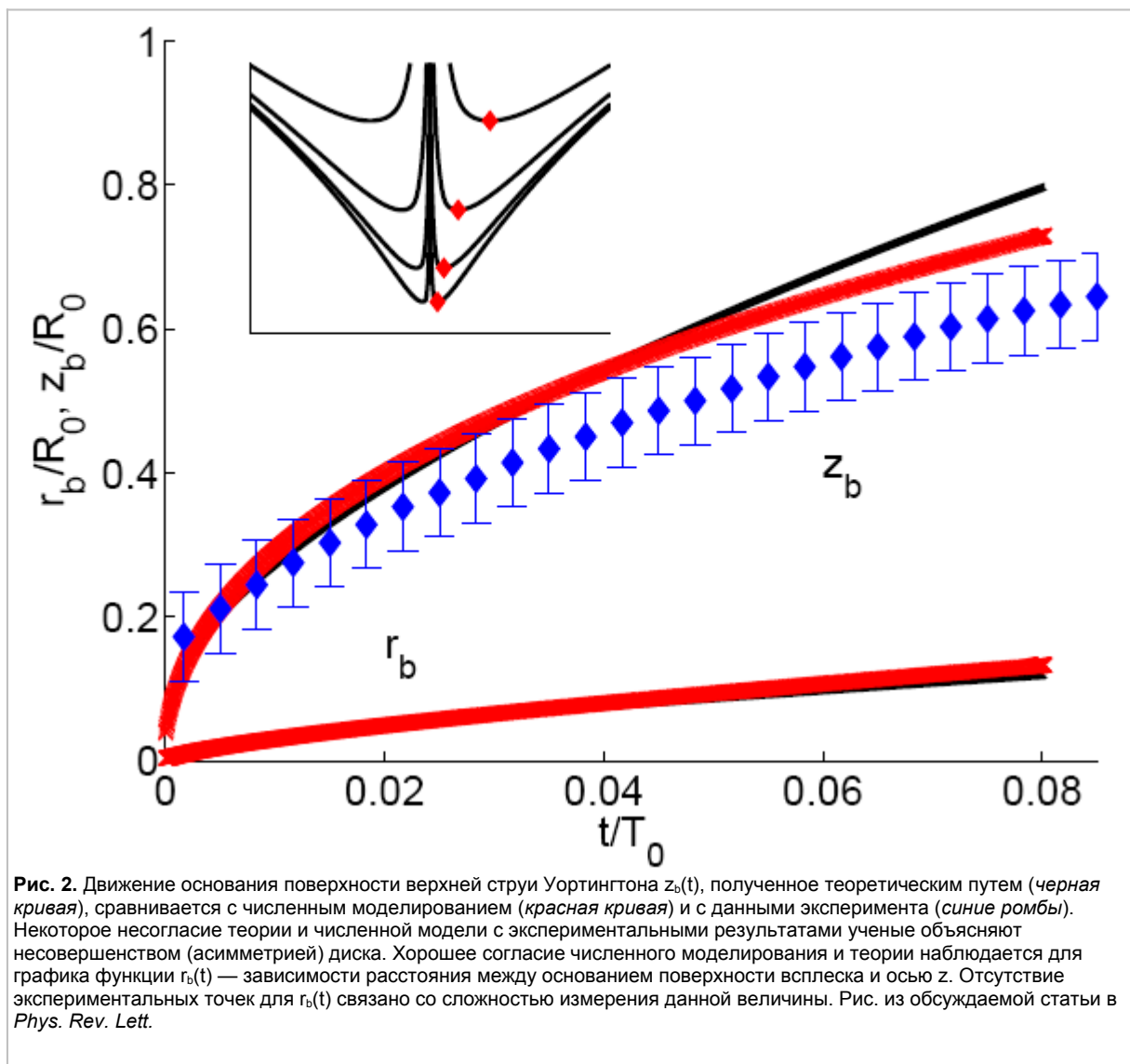
Число Вебера ([Weber number](#)), We , определяется как соотношение инерционных сил и поверхностного натяжения. Для больших чисел Вебера доминируют инерционные силы, для маленьких — силы поверхностного натяжения. Число Вебера имеет значение при формировании волн на свободных поверхностях, для потоков жидкости в капиллярах и каналах, а также в формировании капелек. При небольших числах доминируют силы, связанные с поверхностью.

[Число Фруда](#), Fr , имеет большое значение для гидродинамики системы в гравитационном поле. Оно характеризует соотношение между инерционными силами и гравитацией. При больших значениях числа Фруда эффектом силы тяжести пренебрегают, при малых значениях не учитывают уже инерцию.

Падение диска в воду с последующим образованием полости, ее схлопыванием и генерацией всплесков фиксировалось высокоскоростной камерой — 30 000 кадров в секунду (см. [видео](#)). Затем авторы, используя специальные численные методы, промоделировали исследуемое явление — правда, уже с учетом сил поверхностного натяжения, но пренебрегая сопротивлением воздуха. На рис. 1 показаны изменения в топологии полости — от момента отсечки до момента, когда нижний всплеск «догоняет» падающий диск (см. также [анимацию моделирования](#)).

Координата $z = 0$ здесь соответствует точке отсечки воздушной полости, которая создается в момент времени $t = 0$. Скорость, расстояние и время нормировались соответственно на величины v_0 , R_0 и T_0 , где T_0 — некое характерное время, которое вводилось как отношение R_0/v_0 и составляло 0,02 с (таким образом, 0,08 на графике соответствует реальному времени

$0,08 \cdot 0,02 = 0,0016$ с). Изучая формирование струй Уортингтона, авторы сфокусировали внимание на динамике поведения основания всплеска — самой низкой точки его поверхности (показана на вставке на рис. 2 красным цветом).



Основными моделируемыми параметрами были величины z_b (координата основания поверхности верхней струи Уортингтона) и r_b (расстояние от z_b до вертикальной оси всплеска z). Видно, что численная модель явления (показана красными кривыми) неплохо согласуется с экспериментально наблюдаемыми данными (синие ромбы). Интересно, что процесс формирования всплесков занимает очень мало времени — глядя на рисунок 1b, можно подсчитать, что с момента образования конечно-временной сингулярности проходит около 0,2 мс.

Такая большая скорость, однако, не связана с течением жидкости вокруг точки отсечки полости, как это объясняется и описывается в других статьях и экспериментах.

С чем это связано, показывает рис. 3. Он демонстрирует, что после исчезновения точки отсечки жидкость практически не ускоряется вдоль оси z , зато вблизи оснований всплеска появляются области, где вертикально направленное ускорение жидкости принимает огромное значение — порядка 10^4 м/с². И именно эти области, а не конечно-временная сингулярность (точка отсечки), ответственны за образование струи Уортингтона. Эти области за счет своего большого вертикального ускорения как бы выдавливают жидкость вверх в виде тоненькой струи, что в итоге и приводит к наблюдаемому явлению. Причиной очень малой толщины струи являются маленькие размеры областей, где ускорение жидкости велико.

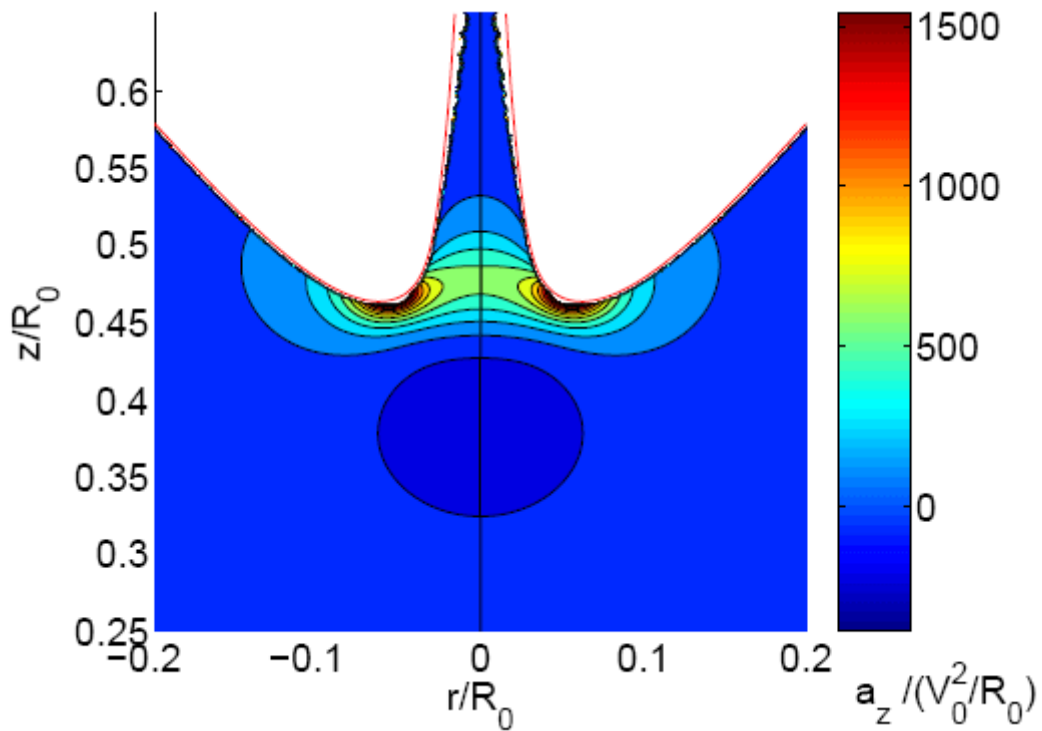


Рис. 3. Распределение вертикального ускорения a_z воды при $t/T_0 = 0,028$. Вблизи оснований поверхности всплеска ускорение a_z резко возрастает. Точка отсечки, или точка конечно-временной сингулярности с координатами $(0,0)$, удалена от струи Уортингтона. Рис. из обсуждаемой статьи в *Phys. Rev. Lett.*

Здесь уместна такая аналогия: нечто подобное наблюдается, когда выдавливается зубная паста из тюбика. Сжимая стенки тюбика, вы провоцируете движение части пасты к отверстию тюбика, а части пасты внутрь. Таким образом, необходимо рассматривать не только образующуюся сингулярность, но и продолжающийся процесс схлопывания полости после ее (сингулярности) исчезновения.

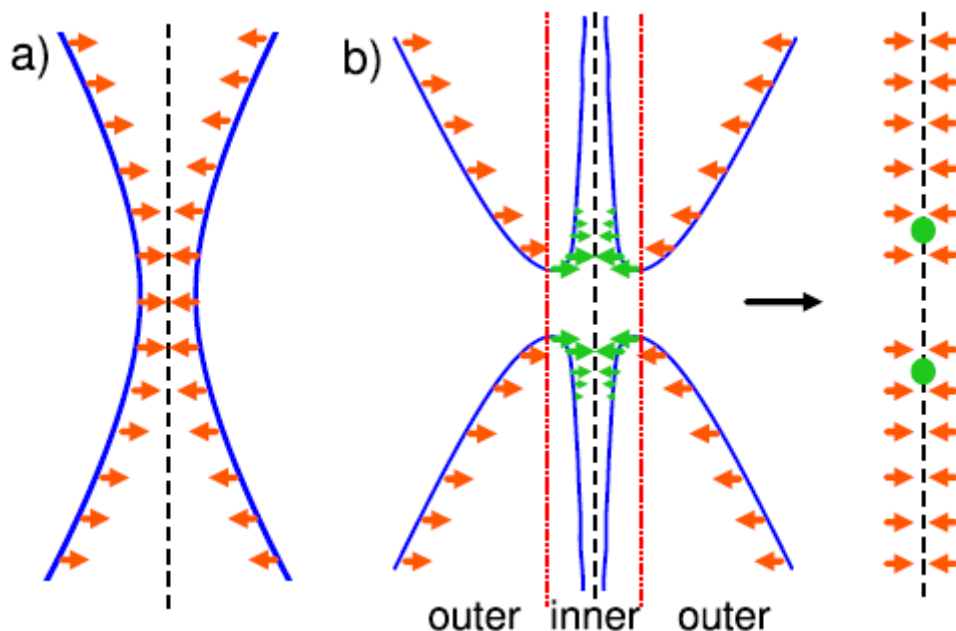


Рис. 4. Схематический рисунок, показывающий образование воздушной полости, ее коллапс и формирование всплесков. Синие линии обозначают границу свободной поверхности жидкости (стенки воздушной полости). Рис. из обсуждаемой статьи в *Phys. Rev. Lett.*

Рис. 4 красноречиво дополняет сказанное выше. На нём схематически изображено, как сталкиваются стенки воздушной полости (или, что то же самое, границы свободной поверхности

воды) и как потом образуются всплески. Зеленые стрелки показывают участки жидкости, ответственные за образование струй Уорthingтона.

Авторы статьи предлагают также и теоретическую модель образования всплеска. На рис. 2 представлен графический результат этой теории — черная кривая, которая неплохо согласуется с численным моделированием и экспериментальными результатами.

Статей, которые изучают такого рода явления, немало (например, см. [Morphological Study of Cavity and Worthington Jet Formations for Newtonian and Non-Newtonian Liquids](#)), но удивительно, что до объяснения такого обыденного эффекта додумались только сейчас.

Источник: Stephan Gekle, José Manuel Gordillo, Devaraj van der Meer, Detlef Lohse. [High-Speed Jet Formation after Solid Object Impact](#) // *Physical Review Letters*, 102, 034502 (2009).

См. также:

[Why Dropping a Stone Makes a Jet?](#), Phys. Rev. Focus 23, story 3 (популярный пересказ статьи).

Юрий Ерин