

03

Образование облака капель при разрушении водяного ядра в процессе свободного падения

© *Е.Е. Мешков, В.О. Орешков, Г.М. Янбаев*

Саровский физико-технический институт —
филиал Национального исследовательского ядерного
университета „МИФИ“, Саров
E-mail: meshkov@sarfti.ru

Поступило в Редакцию 14 февраля 2011 г.

Приведены результаты экспериментального исследования свободного падения приблизительно сферического водяного ядра объемом 0.1–0.5 л из состояния покоя с высот до ~ 5 м. Деформация ядра под действием аэродинамических сил и неустойчивостей приводит к его распаду и образованию облака капель, быстро растущего со временем как в вертикальном, так и в поперечном направлении.

Способ тушения верховых лесных пожаров, описанный в [1], предполагает использование безоболочечных водяных снарядов, разгоняемых давлением продуктов горения или/и детонации смеси горючих газов с воздухом (или кислородом). Грубые оценки указывают на возможность создания устройств (типа пушки), разгоняющих в импульсном режиме практически неограниченные массы воды до скоростей порядка нескольких десятков метров в секунду и забрасывающих их на несколько десятков метров. В этой связи представляет интерес изучение особенностей полета в воздухе безоболочечных водяных снарядов достаточно большой массы.

В работе [2] описаны результаты эксперимента по исследованию свободного падения капли воды диаметром ~ 1.5 см (и соответственно с объемом 1.8 см³) с высоты до ~ 5 м. В процессе полета капля под действием распределения давления на ее поверхности (повышенным по полюсам и пониженным по боковой поверхности) сплющивается и приобретает форму лепешки. Далее она трансформируется в подобие

купола парашюта, который сильно раздувается и вследствие утоньшения лопаается, образуя облако мелких капель.

Из повседневного опыта мы знаем, что характерный размер капель дождя не превышает 5–6 мм и при этом они имеют устойчивую „каплевидную“ форму. Устойчивость их формы объясняется балансом аэродинамических сил, деформирующих каплю, и сил, препятствующих их деформации (поверхностное натяжение). С увеличением размера капли этот баланс нарушается в пользу аэродинамических сил и при этом реализуется режим распада капли по сценарию [2]. По данным [2] этот сценарий устойчиво реализуется для капель диаметром 20 мм и более. Для меньших размеров капель реализация этого сценария имеет вероятностный характер.

Ниже описаны результаты экспериментов, по постановке схожих с результатами [2], но с „каплями“ объемом 0.1–0.5 л. Такие „капли“, по видимому, следует называть „ядрами“.

Водяное ядро сферической формы объемом до 0.5 л создавалось путем разрушения сильно натянутой (при заполнении водой) резиновой оболочки. Первоначально резиновая оболочка (медицинский резиновый напальчник) крепилась на конце цилиндрического держателя из текстолита. На оси держателя имелся канал, в котором помещалась стальная игла. После заполнения резиновой оболочки водой по этому каналу и установки всей сборки в исходное положение на заданной высоте, инициировалось разрушение оболочки в нижней точке перемещением иглы в держателе. Фрагменты сильно растянутой тонкой резиновой оболочки сжимаются, скользя по поверхности ядра, за время порядка нескольких миллисекунд.

Падение водяного ядра и его трансформация регистрировались при помощи цифрового фотоаппарата Cassio Exilim EX-F1 в режиме видеосъемки со скоростью 300 кадров в секунду. В каждом опыте съемка производилась на одном из интервалов высот 0–1, 1.4–2.0 и 3.9–5 м.

На рис. 1 приведены кадры видеogramм, которые иллюстрируют фазы трансформации водяного ядра в процессе свободного падения с высоты до ~ 5 м. Всего было проведено около двух десятков опытов. Но в большинстве из них форма ядра носила нерегулярный характер вследствие влияния начальных возмущений, вызванных движением фрагментов резиновой оболочки после инициирования ее разрушения. По этой причине на рис. 1 представлены результаты опытов с ядрами

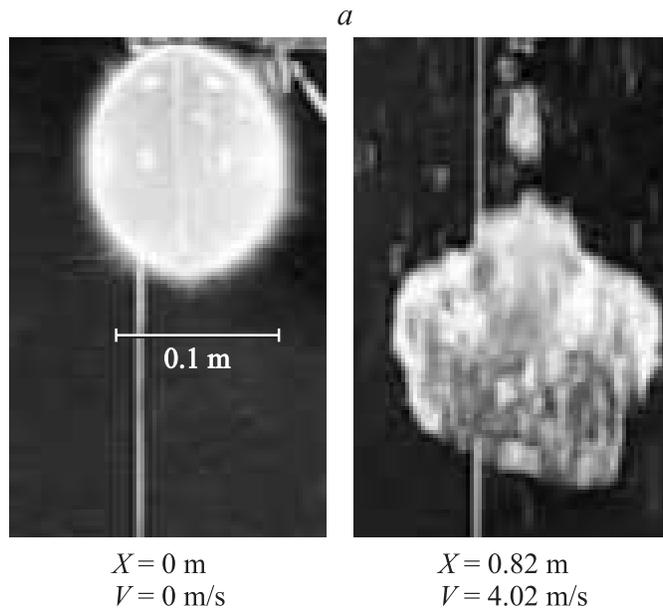


Рис. 1. Деформация и распад водяного ядра в процессе свободного падения: *a* — ядро объемом 0.5 л; интервал регистрации $X = 0 - 0.8 \text{ m}$; *b* — ядро 0.1 л, интервал регистрации $X = 1.7 - 2.4 \text{ m}$; *c* — ядро объемом 0.2 л; интервал регистрации $X = 4.3 - 5.3 \text{ m}$. Значения скорости падения — расчетная оценка без учета торможения.

равной величины, формы которых имели наиболее регулярный характер. Под каждым кадром приведена величина пути X , пройденного ядром к этому моменту. Расстояние X изменяется от нижней точки ядра в состоянии покоя до такой же точки в стадии полета. Время полета t и скорость V ядра можно оценить по элементарным формулам $t = (2X/g)^{1/2}$ и $V = (2gX)^{1/2}$.

Уже на начальной стадии падения (рис. 1, *a*) наблюдается деформация ядра. Вначале оно имеет приблизительно сферическую форму, однако в процессе падения под действием встречного потока воздуха на поверхности ядра возникает распределение давления — повышенное по полюсам и пониженное по экватору. В ре-

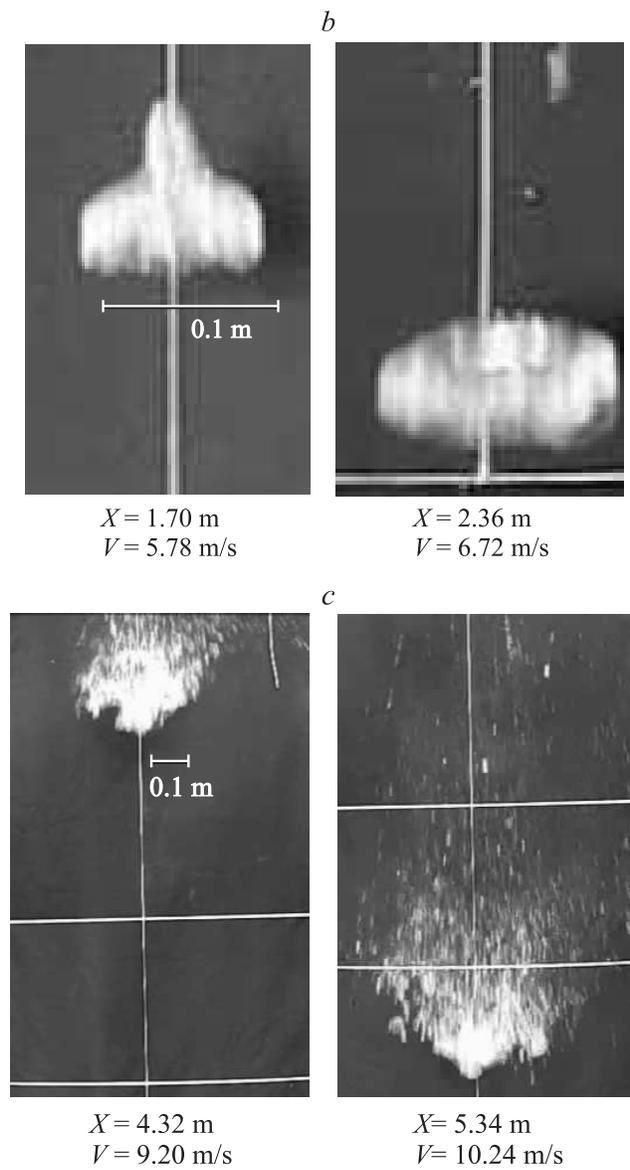


Рис. 1 (продолжение).

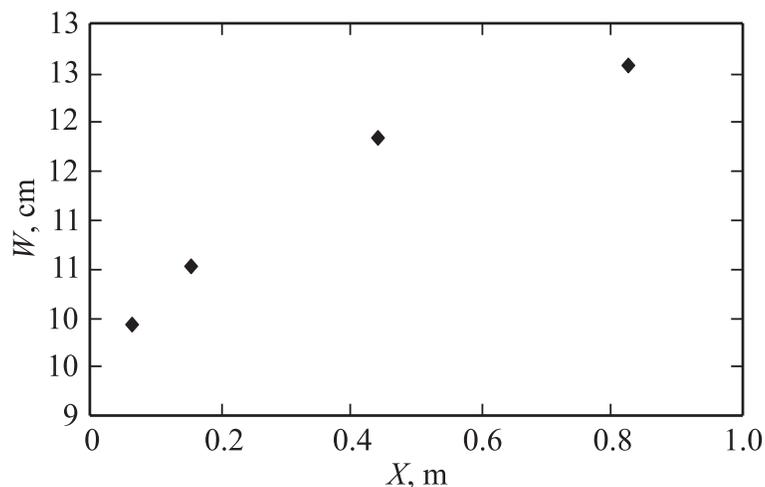


Рис. 2. Изменение поперечного размера W водяного ядра объемом 0.5 л в процессе свободного падения из состояния покоя.

зультате ядро в целом начинает сплющиваться по вертикальной оси (рис. 2). Одновременно на нижней поверхности ядра начинают расти возмущения. Эта неустойчивость нижней поверхности ядра, возможно, объясняется действием неустойчивости Рэля–Тейлора [3]. Эта неустойчивость может действовать в течение короткого времени (\sim несколько ms), когда резиновая оболочка уже освободила нижнюю поверхность ядра, но еще удерживает боковую поверхность. Начальные возмущения создаются тангенциальным давлением остатков резиновой оболочки на поверхность ядра. Когда ядро, полностью освобождаясь от резиновой оболочки, начинает свободное падение (и приходит как бы в состояние невесомости), действие неустойчивости Рэля–Тейлора прекращается, но подросшее к этому моменту времени начальное возмущение нижней поверхности ядра продолжает расти по инерции.

На более поздней стадии полета (рис. 1, *b*) процесс деформации ядра продолжается, и в результате ядро принимает форму диска, рыхлого по структуре. Формирование такой рыхлой структуры происходит по механизму, сходному с наблюдаемым в эксперименте [2]; развитие

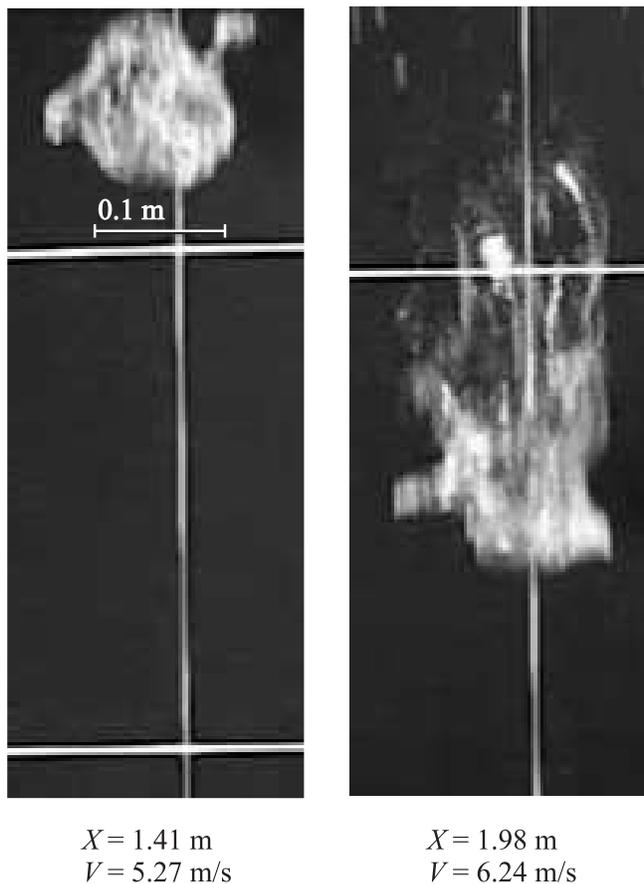


Рис. 3. Образование раздувающегося пузыря и его разрушение при падении водяного ядра (объем 0.2 л).

неустойчивости нижней поверхности падающего диска приводит к образованию каналов, пронизывающих его тело. Подтверждением этого заключения являются результаты опыта (рис. 3), в котором наблюдается образование раздувающегося купола пузыря (как и в опытах [2]). Достигнув критической величины, пузырь лопается с образованием

облака мелких капель, разлетающихся в разные стороны. Этот механизм разрушения ядра повторяется в процессе полета неоднократно.

Совместное действие описанных механизмов (деформация ядра и неустойчивость его нижней поверхности) приводит к разрушению водяного ядра и образованию облака мелких капель (рис. 1, *с*). Облако капель приобретает форму конуса, острием направленного вниз. Характерный размер облака, образовавшегося из ядра объемом 0.2 л, достигает величины ~ 0.5 м и продолжает расти, увеличиваясь как в поперечном размере, так и по вертикали.

Можно предположить, что с увеличением размеров водяного ядра (и изменением его формы в начальном положении) будут те же закономерности, что и в описанных экспериментах, и в результате такое ядро должно трансформироваться в облако капель. Это соображение относится не только к случаю свободного падения ядра, но и к любому случаю полета ядра в атмосфере. Эти же закономерности могут определять дальнейшее развитие облака. Облако в свободном полете будет тормозиться воздухом, т.е. ускорение будет направлено от более легкого воздуха к более тяжелому облаку капель; это соответствует случаю развития неустойчивостей Релея–Тейлора. Развитие такой неустойчивости на границе летящего облака диспергированной среды наблюдалось в экспериментах [4].

Таким образом, разработана методика и проведена серия экспериментов по исследованию течения, возникающего при свободном падении сферического ядра объемом до 0.5 л. Практически с самого начала падения под действием аэродинамических сил появляется тенденция сплющивания ядра и превращения его в диск, растущий со временем по диаметру. Одновременно наблюдается развитие неустойчивости нижней поверхности этого диска. Одновременное действие этих факторов приводит к полному разрушению ядра и превращению его в облако капель, быстро растущее со временем как по вертикали, так и в поперечном направлении.

В заключение авторы выражают признательность Т.С. Биюшкиной, М.Е. Мешкову, Я.В. Федоренко, А.Д. Шамшину за помощь в проведении экспериментов и Е.Н. Поздняковой за помощь в оформлении статьи.

Список литературы

- [1] *Мешков Е.Е.* Способ импульсного распыления жидкости / Заявка № 2008108320 от 03.03.2008.
- [2] *Magarvey R., Taylor R.* // *J. Appl. Phys.* 1956. V. 27. P. 1129–1135.
- [3] *Taylor G.I.* // *J. Proc. Roy. Soc.* 1950. V. A201. P. 192.
- [4] *Близнецов М.В., Жидов И.Г., Мешков Е.Е., Невмержицкий Н.В., Сеньковский Е.Д., Сотсков Е.А.* // *Письма в ЖТФ.* 2002. В. 2. С. 90–94.