

УДК 532.23:535

Е.Е.Мешков<sup>1</sup>, В.О.Орешков<sup>1</sup>, Я.В.Федоренко<sup>2</sup>, Г.М.Янбаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СарФТИ НИЯУ МИФИ, г.Саров

<sup>2</sup>Физико-Математический Лицей №15, г.Саров

## РАЗРУШЕНИЕ ВОДЯНОГО СНАРЯДА В ПРОЦЕССЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

*Описаны методика и некоторые результаты экспериментального исследования трансформации и разрушения в процессе свободного падения водяных снарядов в форме: а) сферического ядра объемом до 0,5 л и б) цилиндра с разным отношением длины к диаметру и объемом до 0,2 л.*

### СВОБОДНОЕ ПАДЕНИЕ, ВОДЯНОЙ СНАРЯД, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

1. 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 полёта в воздухе водяных снарядов различной формы и достаточно большой массы.

В работе [2] описаны результаты эксперимента по исследованию свободного падения капли воды диаметром  $\sim 1,5$  см (и, соответственно, с объемом  $\sim 1,8$  мл) с высоты до  $\sim 5$  м. В процессе полёта капля под действием распределения давления на её поверхности (повышенным по полюсам и пониженным по боковой поверхности) сплющивается и приобретает форму лепёшки. Далее она трансформируется в подобие купола парашюта, который сильно раздувается и вследствие утоньшения лопается, образуя облако мелких капель.

Разработана методика экспериментального исследования трансформации и разрушения в процессе свободного падения водяных снарядов в форме а) сферического ядра объемом до 0,5 л [3] и б) цилиндра с разным отношением длины к диаметру и объемом до 0,2 л. Ниже описаны результаты подобных экспериментов.

2. Водяной снаряд сферической формы создавался путем разрушения сильно натянутой (при заполнении водой) оболочки из тонкой резины при прокалывании ее стальной иглой. Снаряд цилиндрической формы создавался путем разрушения тонкой резиновой диафрагмы, натянутой на конце стеклянной (или пластмассовой) трубки, заполненной водой. Падение водяного снаряда и его трансформация регистрировалась при помощи цифрового фотоаппарата Casio Exilim EX-F1 в режиме скоростной видеосъемки.

Общий вид постановки опытов с цилиндрическими снарядами приведен на рис.1. Трубка (1), на конце которой была натянута диафрагма из тонкой резины, заполнялась водой до заданной высоты. Трубка жестко крепилась к кронштейну в вертикальном положении. При пробое диафрагмы выходное отверстие трубки полностью открывается за короткое время ( $\sim 1 - 2$  мс) и цилиндрический водяной снаряд свободно падает вниз. Регистрация падения снаряда производится фотоаппаратом Casio Exilim EX-F1 (2) в режиме скоростной видеосъемки со скоростью 1200 кадров в секунду. Для подсветки использовались

галогеновые лампы мощностью 1 кВт, установленные на этажерке (4). Для обеспечения равномерности освещения использовался полупрозрачный экран (3).

В случае снаряда в форме сферического ядра его падение регистрировалось на фоне экрана из черной ткани; подсветка падения ядра осуществлялась двумя лампами, расположенными сбоку. В каждом из опытов съемка падения снаряда производилась на одном из интервалов высот  $0 \div 1$ ;  $1,4 \div 2,4$  и  $3,9 \div 5$  м.

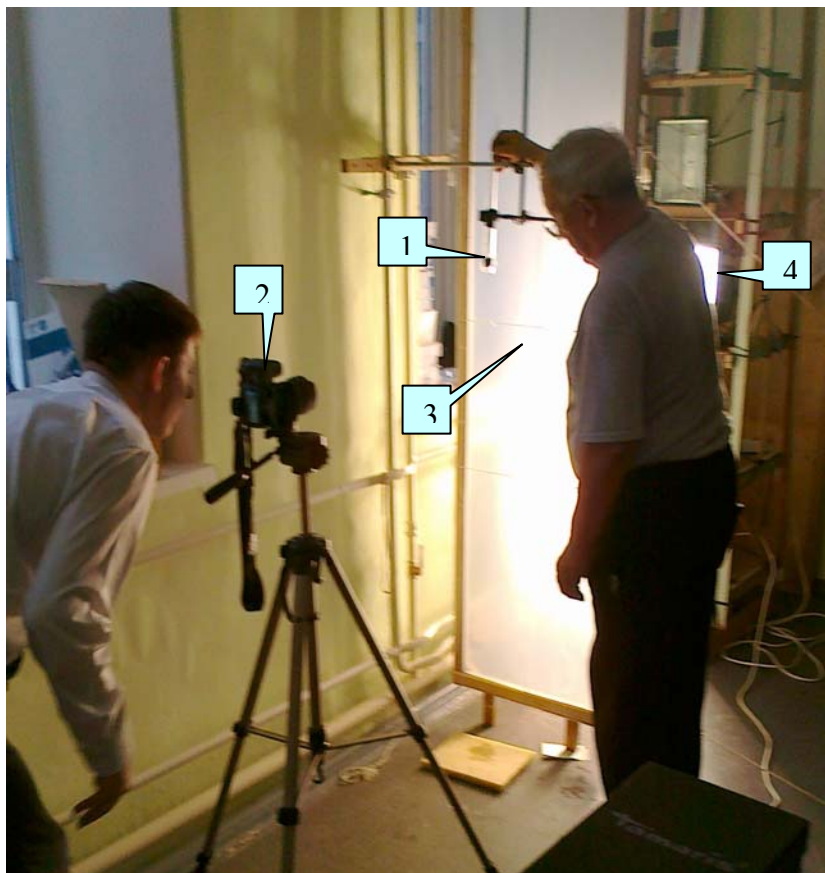


Рис.1. Фотография общего вида проведения эксперимента по исследованию падения цилиндрического водяного снаряда. Обозначения: 1 – устройство для запуска цилиндрического водяного снаряда; 2 – фотоаппарат Casio Exilim EX-F1; 3 – полупрозрачный экран; 4 – этажерка с расположенными на ней источниками света

3. При падении снаряда в форме сферического ядра объемом до 0,5 л наблюдаются такая же картина трансформации как и в случае падения сравнительно небольшой капли объемом  $2 \text{ см}^3$  [2]. В процессе полёта ядро под действием распределения давления на его поверхности (повышенным по полюсам и пониженным по боковой поверхности) сплющивается и приобретает форму плоской лепёшки. Одновременно на нижней поверхности ядра начинают расти возмущения. Эта неустойчивость нижней поверхности ядра, по-видимому, объясняется действием неустойчивости Рэля–Тейлора [4]. На более поздней стадии полёта 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 неустойчивости нижней поверхности падающего диска приводит к образованию каналов, пронизывающих его тело. При выходе каналов на верхнюю поверхность диска наблюдается множественный процесс образования раздувающихся куполов пузырей (как и в опыте [2]). Достигнув критической величины, пузыри лопаются с образованием облака мелких капель, разлетающихся в разные стороны.

Совместное действие описанных механизмов (деформация ядра и неустойчивость его нижней поверхности) приводит к разрушению водяного ядра и образованию облака мелких капель (рис 2). Под каждым кадром приведена величина пути  $X$ , пройденного ядром к этому моменту. Облако капель, образовавшееся при разрушении ядра объемом 0,2 л, приобретает форму конуса, острием направленного вниз. Характерный размер облака достигает величины  $\sim 0,5$  м и продолжает расти (увеличиваться) как в поперечном размере, так и по вертикали.

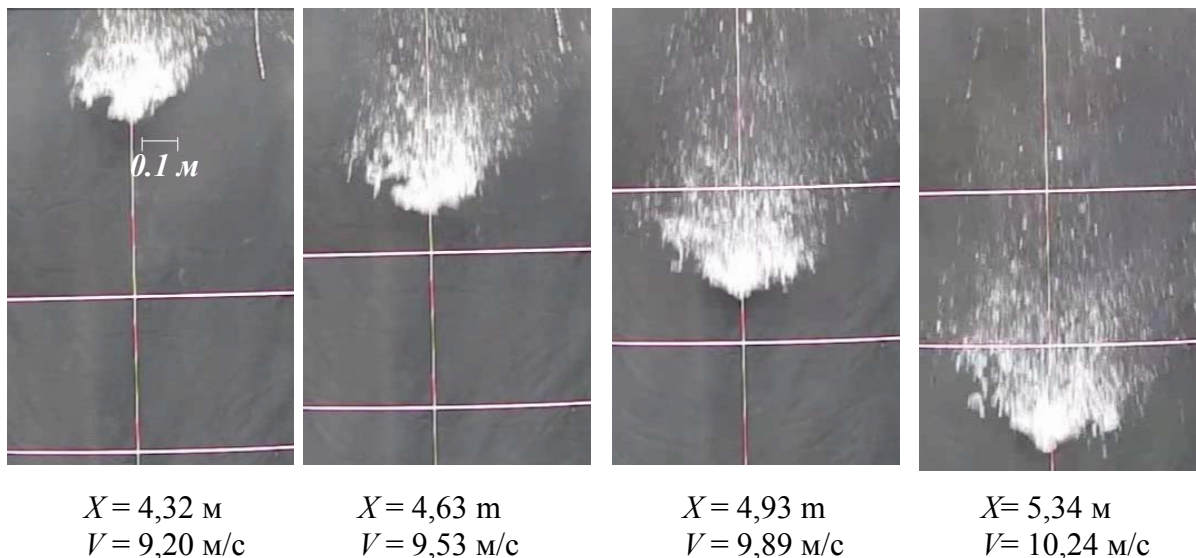


Рис.2. Образование и развитие облака капель в процессе распада водяного ядра (0,2 л) при свободном падении [3]. Интервал высот, при которых производилась регистрация,  $X = 4,3 \div 5,3$  м. Расстояние  $X$  измеряется от нижней точки ядра в состоянии покоя (до начала падения) и до такой же точки в стадии полёта. Скорость  $V$  ядра можно оценить по элементарной формуле  $V = (2gX)^{\frac{1}{2}}$ . Скорость съемки 300 кадров в секунду.

4. На рис.3 приведены кадры видеोगраммы, иллюстрирующие трансформацию под действием аэродинамических сил цилиндрического водяного снаряда (объем 45 мл, отношение высоты к диаметру 2,4) при его свободном падении. Здесь наблюдаются те же процессы, что и в экспериментах [2] и в опытах со сферическим водяным ядром [3]: наблюдается тенденция к образованию тонкого плоского диска вследствие действия разности давления в потоке, обтекающем падающий цилиндр, – повышенное в нижней и верхней части снаряда и пониженное по боковой части.

В тоже время наблюдаются особенности, присущие экспериментам в данной постановке. В начальной стадии течения в носовой части снаряда образуется капля – результат действия неустойчивости Рэлея-Тейлора; одновременно начинается сужение хвостовой части снаряда. Еще более необычным является образование сферического воздушного пузыря в хвостовой части снаряда (кадры 1 – 3), который вначале оказывается прикрепленным к длинному тонкому «хвосту» снаряда. Со временем «хвостик» вытягивается и распадается на цепочку мелких капель. Пузырь при этом лопаётся. Происхождением своим и пузырь и «хвостик» обязаны полуму водяному цилиндру, который формируется при выходе водяного снаряда из трубки; эта цилиндрическая тонкостенная оболочка из воды, соединяющая конец трубки и снаряд, довольно долго тянется за снарядом. Затем эта цилиндрическая оболочка схлопывается под действием поверхностного натяжения, формируя сферический воздушный пузырь.

5. Можно предположить, что с увеличением размеров водяного снаряда будут наблюдаться те же закономерности, что и в описанных выше экспериментах, и в результате снаряд должен трансформироваться в облако капель. Это соображение относится не только к случаю свободного падения снаряда, но и к любому случаю полета его 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 Рэлея-Тэйлора. Развитие такой неустойчивости на границе летящего облака диспергированной среды наблюдалось в экспериментах [5].



Рис.3. Трансформация цилиндрического водяного снаряда (объем 45 мл, отношение высоты к диаметру 2,4) при его свободном падении. Под действием аэродинамических сил цилиндр приобретает каплевидную форму (кадры 1 – 3), затем приобретает форму шурупа (кадр 4) и постепенно превращается в плоский диск (кадры 5 – 8). На рисунке приведены кадры двух разных опытов (кадры 1 – 4, интервал высот падения  $\sim 0 - 1$  м; кадры 5 – 8, интервал  $\sim 1 - 2$  м). На кадре № 6 расстояние между реперами (две горизонтальные линии) – 0,4 м.  
Скорость съемки 1200 кадров в секунду

## **Литература**

1. **Мешков Е.Е.** Способ импульсного распыления жидкости / Заявка №2008108320 от 03.03.2008
2. **Magarvey R. & Taylor R.** Free Fall Breakup of Large Drops /J. Appl. Phys., 27, p.p. 1129-1135
3. **Мешков Е.Е., Орешков В.О., Янбаев Г.М.** Образование облака капель при разрушении водяного ядра в процессе свободного падения. / Письма в ЖТФ (в печати).
4. **Taylor G.I.** The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. /I. Proc. Roy. Soc., v.A201, 1950, p.192.
5. **Развитие** неустойчивости Рэля – Тейлора на границе слоя сыпучей среды, ускоряемого сжатым газом / Блинецов М.В. , Жидов И.Г. , Мешков Е.Е. и др. // Письма в ЖТФ, т.28, вып.2, (2002) с.90-94.