

03

Числа Вебера для стадий трансформации водяных снарядов при их свободном падении в воздухе

© Р.С. Волков¹, Г.В. Кузнецов¹, П.А. Куйбин², П.А. Стрижак¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
E-mail: pavelspa@tpu.ru

Поступило в Редакцию 19 мая 2015 г.

Представлены результаты высокоскоростной (до 10^5 fps) видеорегистрации процессов разрушения водяных снарядов („ядер“ сферической формы с начальным объемом 0.05–0.5 л) в процессе свободного падения в воздушной среде (с высоты 3 м). Выделены четыре стадии трансформации снарядов с последующим образованием облака капель. Установлено, что переходы между стадиями трансформации реализуются по истечении меньших времен перемещения в воздухе при увеличении исходных объемов воды. Определены соответствующие установленным стадиям числа Вебера.

Выполненные в последние годы исследования (например, [1–4]) закономерностей движения водяных снарядов достаточно больших объемов (до 0.5 л) позволили установить необходимые и достаточные условия их трансформации с последующим разрушением при свободном падении в воздухе. Основным возможным приложением результатов исследований [1–4] является тушение пожаров „безоболочечными“ [2] водяными „ядрами“ (объемами от 0.1 до 0.5 л). Используемые в экспериментах [2] средства регистрации позволили условно выделить типичные конфигурации крупных (объем 0.1–0.5 л) водяных снарядов в процессе разрушения при свободном падении в воздухе [2]. Но не определены характерные особенности изменения скоростей движения и размеров основной части снаряда, а также отрывающихся от него капель и фрагментов. В [2] также не вычислены числа Вебера, соответствующие стадиям („ядро“ → „лепешка“ → неустойчивая жидкостная структура с пузырями → облако капель) разрушения снаряда. Это, скорее всего,

обусловлено ограниченными возможностями измерительной техники [2] и применяемого для обработки результатов программного обеспечения. Актуальность исследования закономерностей разрушения водяных снарядов при свободном падении в воздушной среде возрастает в связи с появлением в последние годы результатов (например, [5,6]), иллюстрирующих нецелесообразность (избыточность) применения при тушении пожаров больших масс воды. Представляет интерес определение значений характеристик стадий трансформации снарядов объемом 0.05–0.5 л и размеров капель, а также капельных облаков, которые формируются после распада водяных „ядер“ под действием аэродинамических сил.

Задача данной работы — определение по результатам экспериментальных исследований чисел Вебера для возможных стадий трансформации водяных снарядов при их свободном падении в воздухе. В проведенных экспериментах применялся стенд, по основным элементам аналогичный используемым в опытах [7,8]. В отличие от последних, вместо кросскорреляционных фоторегистрирующих элементов использовались две высокоскоростные (до 10^5 f/s) видеокамеры („Phantom V411“ и „Phantom Miro M310“). Для обработки данных видеорегистрации применялось программное обеспечение „Тема Automotive“ [9,10], которое позволяло выполнять непрерывное слежение за перемещающимся водяным снарядом и отрывающимися фрагментами.

Для создания водяного „ядра“ сферической формы (аналогично опытам [2]) использовалась тонкая резиновая оболочка (медицинский напальчник), заполненная водой (в соответствии с требуемым исходным объемом — 0.05–0.5 л). Для варьирования начального объема V (с шагом 0.05 л) воды использовался одноканальный дозатор „Finnpipette Novus“ (погрешность измерения — не более 0.5% от набранного объема). Оболочка, заполненная водой, закреплялась на керамическом стержне. С использованием координатного механизма „Полис“ к ней подводился держатель со стальной иглой. Аналогично экспериментам [2] проводились испытания с целью выделения оптимального (по форме получаемого водяного снаряда) участка контакта иглы с оболочкой. Основной задачей являлось обеспечение сферической формы „ядра“ после удаления оболочки. Установлено, что такие условия возможны при контакте иглы с верхней частью последней. Проведенные эксперименты показали, что фрагменты оболочки после разрушения в течение нескольких десятков миллисекунд отходили от поверхности „ядра“, которое начинало движение под действием гравитационных

сил (высота закрепления заполненной водой оболочки относительно основания стенда составляла 3 м). Процессы движения, деформации и разрушения снаряда регистрировались двумя видеокамерами, установленными на разных высотах для фиксации всего пути его перемещения (L — расстояние от нижней точки „ядра“ в момент формирования до такой же точки в процессе перемещения). Также для 3D-регистрации процесса разрушения водяного „ядра“ проводились эксперименты, в которых видеокамеры располагались на одном уровне под углом 90° относительно друг друга.

Для каждого исходного объема водяного „ядра“ проводились 10 экспериментов. Форма „ядра“ после удаления оболочки в некоторых экспериментах носила нерегулярный (отличалась от сферической за счет возмущений, вызванных движением фрагментов оболочки) характер (аналогично [2]). За счет выбора резиновых оболочек с малой толщиной стенок (обеспечения максимально возможного давления жидкости внутри оболочки) число таких опытов из 10 составляло от 2 до 4. Они исключались из дальнейшего рассмотрения (анализ проводился для опытов, в которых „ядро“ имело близкую к сферической форму).

Систематические погрешности измерения размеров снаряда, оторвавшихся капель и фрагментов не превышали 0.1 мм. Максимальные погрешности определения скоростей движения снаряда и отрывающихся фрагментов составили 0.05 м/с. За счет применения функций непрерывного слежения за снарядом минимизированы случайные погрешности экспериментов, вызванные, главным образом, нерегулярностью (которая выделена в качестве определяющей в опытах [2]) формы снарядов при идентичных условиях.

Выполненные эксперименты показали, что водяное „ядро“ (рис. 1) интенсивно деформируется уже с момента формирования (рис. 1, *a*). При этом для всех исследованных объемов воды (0.1–0.5 л) зарегистрированы идентичные по физике протекающих процессов стадии трансформации: „сплющивание“ снаряда и формирование „перешейков“ (рис. 1, *b*), образование пузырей („парашютов“) (рис. 1, *c*), разрушение пузырей и образование водяных цепочек (рис. 1, *d*), образование облака мелких капель (рис. 1, *e*). Их реализацию можно объяснить тем, что при движении снаряда возрастает скоростной напор внешней газовой среды на него. Это приводит к его „сплющиванию“ — принятию формы „блина“ (рис. 1, *b*) или „лепешки“ [2]. За счет вытягивания в поперечном направлении снаряда его продольный размер значительно уменьшается.

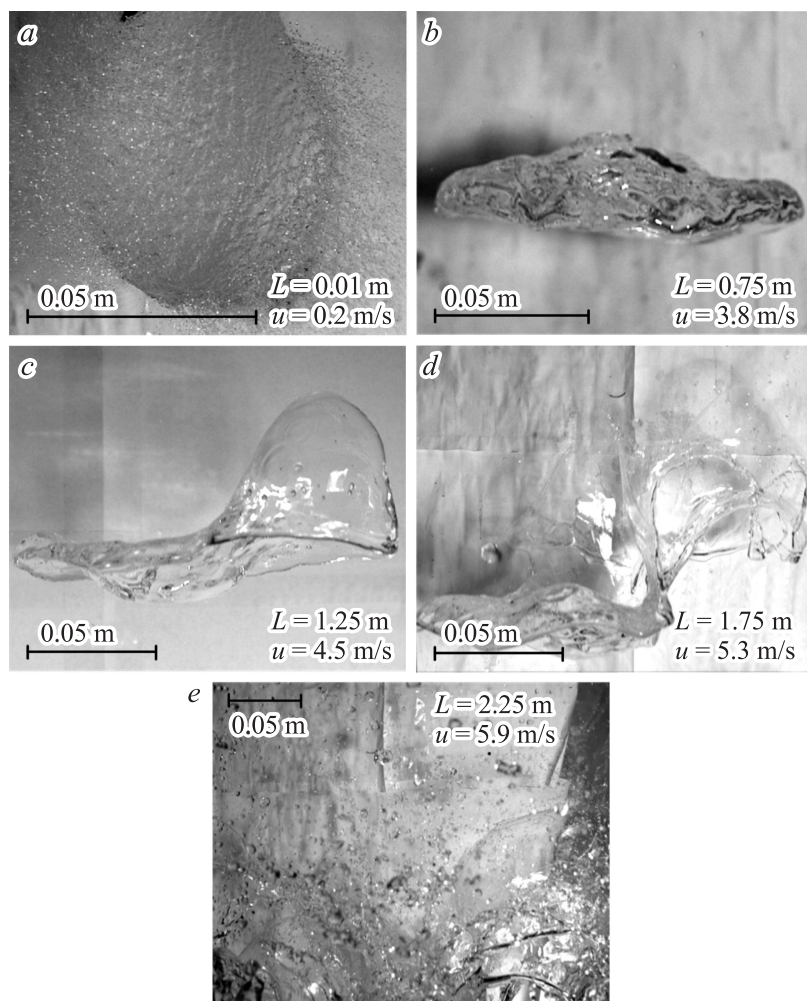


Рис. 1. Видеокadres с изображениями снаряда (исходный объем — 0.15 л) на разных стадиях трансформации: *a* — формирование „ядра“, *b* — „сплющивание“ снаряда, *c* — образование пузырей, *d* — разрушение пузырей и образование водяных „депочек“, *e* — образование облака мелких капель.

Интенсифицируется неустойчивость поверхности (в первую очередь на „наветренной стороне“), получившая название „неустойчивость Рэлея–Тейлора“ [2]. Причины такой неустойчивости заключаются в разности плотностей (соответственно давлений) жидкости (воды) и газа (воздуха) в поле тяготения. Для системы „снаряд–воздух“ можно выделить две определяющие границы (соответствуют верхней и нижней поверхностям движущегося „блина“) раздела сред. Вследствие большей плотности воды (по сравнению с воздухом) происходит смещение этих границ относительно начального состояния. При этом чем больше толщина „блина“ δ (продольный размер снаряда), тем заметнее этот эффект. Значение δ непостоянно по поперечной относительно траектории движения координате. Поэтому перемещения отдельных участков границ раздела „жидкость–газ“ происходят с разной скоростью. В процессе движения „блина“ его толщина непостоянна по обоим координатным направлениям. Это вызывает непрерывную (самоподдерживающуюся) деформацию поверхности снаряда. На некоторых участках границы снаряда можно выделить уменьшение δ . В этих областях водяной „лепешки“ и образуются пузыри (рис. 1, с). Практически одновременно может формироваться до 4–6 пузырей. После достижения критической толщины стенки пузырей последние лопаются. Это приводит к образованию на их месте каналов, пронизывающих снаряд. По внешнему контуру таких каналов формируются водяные „цепочки“. Разрушение каждого пузыря приводит к интенсификации распада снаряда и образованию облака капель.

Выделенные особенности разрушения снаряда хорошо соответствуют основным „фазам трансформации“ [2]. В отличие от [2] в данной работе выделены типичные переходы между стадиями для разных исходных объемов V (рис. 2). С ростом V переходы между стадиями реализуются по истечении меньших времен перемещения в воздухе и соответственно на малых участках траекторий движения снаряда. Это обусловлено возрастанием аэродинамических сил при повышении размеров „ядра“. При уменьшении последних длительности стадий растут (рис. 2). Видеограммы экспериментов показали, что для больших (максимальные размеры до 30 mm) фрагментов жидкости, отделившихся от основного снаряда, уже на расстоянии около 1.5–2 m от точки начала движения „ядра“ происходят процессы, соответствующие стадиям образования и роста пузырей. Эти результаты иллюстрируют цепной характер разрушения снаряда и его фрагментов.

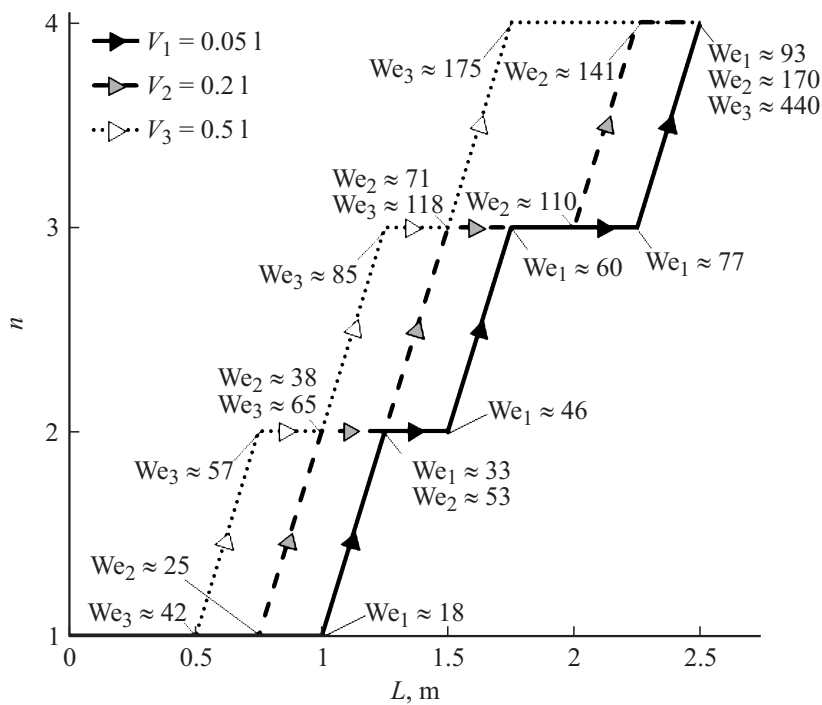


Рис. 2. Характерные переходы между стадиями разрушения (n — порядковый номер стадии) водяного снаряда с разным начальным V (индексы 1–3 соответствуют объемам 0.05, 0.2, 0.5 л).

На рис. 2 приведены числа Вебера ($We = u^2 d \rho / \sigma$ [11], u — скорость движения снаряда, м/с; d — его максимальный поперечный размер, м; плотность воздуха $\rho \approx 1 \text{ kg/m}^3$; поверхностное натяжение воды на границе с воздухом $\sigma \approx 0.0618 \text{ N/m}$), соответствующие переходам между стадиями трансформации. Видно (рис. 2), что для разных начальных объемов „ядра“ значения We при переходе от стадии к стадии довольно значительно отличаются. Это обусловлено разными скоростями движения и соответственно трансформации рассматриваемых снарядов (рис. 2). В частности, снаряды объемом около 0.05 л проходят все четыре стадии трансформации за 0.85 с, а при $V = 0.5 \text{ л}$ общая

длительность этих стадий может составлять 0.6 s. Выделенные значения „переходных“ чисел Вебера расширяют представления о критических значениях We для больших „капель“ [11].

Определены минимальные и максимальные объемы отрывающихся одиночных капель и фрагментов жидкости на каждой стадии. Так, в частности, для первой стадии характерны отрывающиеся капли и фрагменты размерами 4–30 mm, на второй — от 3 до 25 mm, на третьей — от 3 до 20 mm, а для четвертой характерны капли размерами менее 5 mm. Это обусловлено ростом аэродинамических сил, действующих на снаряд, а также тем, что на всех последующих стадиях трансформации происходят процессы, характерные для предшествующих (например, непрерывное сплющивание основной массы снаряда, образование и рост пузырей, формирование водяных „цепочек“ и др.). Условный диаметр облаков капель после прохождения снарядом 3 m достигал в проведенных экспериментах 0.5 m. С использованием специализированных алгоритмов „Тема Automotive“ выполнены оценки роста общей площади внешней поверхности (S_1) снаряда (за счет его распада, отрыва капель и фрагментов) для выделенных стадий по сравнению с исходной (S_0), соответствующей „монокристаллическому“ состоянию („ядру“). Установлено, что отношение S_1/S_0 на первой стадии (например, при начальном объеме водяного массива 0.5 l) может достигать 4, на второй — 7, третьей — 10, четвертой — 24. С ростом V соотношение S_1/S_0 для каждой стадии нелинейно увеличивается. Можно сделать вывод о том, что характерные площади поверхности водяного массива могут уже через несколько метров движения даже без специализированного распыления кратно превышать аналогичные параметры исходного „ядра“.

Выделенные условия переходов между стадиями (и соответствующие им числа Вебера) расширяют современные представления (в частности, [2–4]) о закономерностях трансформации и разрушения водяных „ядер“ в режиме свободного падения. Их можно применять при разработке перспективных технологий использования жидкостей не только в процессе пожаротушения, но и в различных оросительных системах.

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований определены числа Вебера, соответствующие характерным стадиям трансформации водяных снарядов при их свободном падении. Показано, что значения We , соответствующие полному распаду снарядов (образованию капельных облаков), существенно превышают аналогичные значения для капель малых размеров. Этот результат

иллюстрирует ограничения подхода простого масштабирования данных по каплям на водяные снаряды. Для прогнозирования условий трансформации последних можно использовать представленную на рис. 2 диаграмму.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (14-39-00003).

Список литературы

- [1] Мешков Е.Е. Способ импульсного распыления жидкости / Заявка № 2008108320 от 03.03.2008.
- [2] Мешков Е.Е., Орешков В.О., Янбаев Г.М. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 15. С. 79–86.
- [3] Paruchuri S., Brenner M.P. // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. P. 134 502.
- [4] Reyssat E., Chevy F., Biance A.L., Petitjean L., Quere D. Shape and instability of free-falling liquid globules // Europhys. Lett. 2007. P. 34 005.
- [5] McAllister S. // Fire Saf. J. 2013. V. 61. P. 200–206.
- [6] Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // Fire Saf. J. 2014. V. 70. P. 61–70.
- [7] Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 12. С. 11–18.
- [8] Волков Р.С., Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 3. С. 50–58.
- [9] Janiszewski J. // Metrol. Measur. Sys. 2012. V. 19. N 4. P. 797–804.
- [10] Janiszewski J. // Int. J. Solids Struct. 2012. V. 49. N 7–8. P. 1001–1008.
- [11] Терехов В.И., Пахомов М.А. Тепломассоперенос и гидродинамика в газокпельных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009.