

УДК 532.613.5:532.529.6

ТРАНСФОРМАЦИИ ПЕРЕМЫЧКИ В ПРОЦЕССЕ ОТРЫВА КАПЛИ

Ю. Д. Чашечкин, В. Е. Прохоров

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, 119526 Москва, Россия
E-mails: chakin@ipmnet.ru, prohorov@ipmnet.ru

Методом высокоскоростной видеосъемки исследована геометрия течений при отрыве висющих капель жидкостей, существенно различающихся по физическим свойствам (спирта, воды, глицерина, масла). Изучена динамика процессов, происходящих с образованием двух характерных форм перемычки: слабонеоднородной по толщине и с истончением верхнего и нижнего концов. Показано, что процесс изменения формы оторвавшейся перемычки имеет ряд стадий, определяемых свойствами жидкости. В результате перемычка превращается в мелкую каплю — сателлит.

Ключевые слова: капля, сопло, отрыв, поверхностное натяжение, вязкость, структурные элементы, сателлит, перемычка, характерные масштабы, динамика.

DOI: 10.15372/PMTF20160303

Введение. Изучение процессов формирования и отрыва капель жидкости под действием силы тяжести в атмосфере, одной жидкости в другой или пузырьков газа в жидкости имеет большое теоретическое и прикладное значение. Начиная со второй половины XIX в. процесс отрыва капель используется для определения коэффициента поверхностного натяжения [1].

Газожидкостные (пузырьковые или пенные) и жидкостно-газовые (аэрозоли, факелы) смеси используются в процессах абсорбции, дистилляции, эмульгирования, сепарации, флотирования (переноса веществ пузырьками и каплями) в различных отраслях промышленности с целью обогащения и физико-химической обработки материалов (нефтепереработка, энергетика, металлургия, строительство, биология, медицина). Управление отрывом капель осуществляется в устройствах впрыска топлива в различных двигателях (автомобильных, судовых, авиационных, ракетных) [2], капельного охлаждения в электронике, в том числе работающих в космосе. Широкое распространение получили устройства для создания большого числа однородных капель в различных дозаторах и струйных принтерах.

Форма капель, динамика их образования и отрыва зависят от многих факторов: физических параметров сред (плотности, давления, вязкости, коэффициента поверхностного натяжения), конструкции генерирующего устройства (формы, расположения и скорости движения дозатора, материала, условий смачиваемости), динамического состояния внешней среды (состава, плотности, температуры, скорости течения).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-01-09235-а) и Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН (Программа IV.4.12 “Динамика формирования и взаимодействия волн и вихрей в сплошных средах”).

Значительная часть экспериментальных исследований процесса отрыва выполняется в условиях, когда среда и источник капель неподвижны. Большое внимание уделяется изучению движения и относительно крупных первичных капель, и мелких капель — сателлитов, а также других компонентов течений [3], играющих важную роль в обмене веществом между гидросферой и атмосферой, переносе микроорганизмов и вирусов, распространении инфекций. Обзор работ, посвященных исследованию отрыва капель, приведен в [4].

Совершенствование экспериментальной техники позволяет обнаруживать новые детали картины течений. В последние годы показано, что отрыв капель может происходить непосредственно от маточной жидкости на выходе из дозатора [5], от промежуточной слабokonической перемычки, связывающей отрывающуюся каплю с маточной жидкостью [6], или от неоднородной по толщине перемычки (от ее истонченной части) [7]. При отрыве помимо основной капли образуются более мелкие капли. Детальные исследования геометрии структурных элементов течения при отрыве капель маловязких жидкостей (воды и спирта) проведены в [8], где показано, что процесс отрыва включает стадии медленной и быстрой эволюции течений. Изучению первой из них посвящено большое число работ (см. обзор [4]). Менее изучена вторая стадия, на которой возникают колебания и поверхностные волны на элементах течения. Практический интерес представляет сравнительный анализ геометрии и динамики процессов отрыва капель жидкостей с различающимися физическими свойствами (вязкостью и коэффициентом поверхностного натяжения).

Целью данной работы является экспериментальное исследование геометрии и динамики основных структурных элементов, образующихся при отрыве капель чистых жидкостей (этилового спирта, воды, глицерина, подсолнечного масла) от кругового сопла из плохо смачиваемого материала в воздушной среде, методом съемки с высоким временным и пространственным разрешением. Регистрируются процессы в начальной фазе движения, когда скорость оторвавшейся капли невелика и ее взаимодействием с окружающей воздушной средой можно пренебречь.

1. Определяющие масштабы и безразмерные параметры процесса. В задаче отрыва висящей капли под действием силы тяжести в число определяющих размерных параметров входят ускорение свободного падения g , плотность жидкости ρ , коэффициент поверхностного натяжения σ (и его нормированное на плотность значение $\gamma = \sigma/\rho$), кинематическая ν и динамическая $\mu = \rho\nu$ вязкость, а также диаметр отрывающейся капли D . В процессе формирования и отрыва кромка (или центр) капли движется со скоростью U .

Динамика процесса описывается системой уравнений движения вязкой жидкости с физически обоснованными граничными условиями [9]. Оценка общих свойств системы уравнений и характеристик изучаемых течений проводится на основе анализа характерных временных и пространственных масштабов, которые определяются физическими параметрами изучаемых сред, начальными и граничными условиями [10].

В течениях вязкой жидкости со свободной поверхностью, динамика которой определяется действием сил тяжести и поверхностного натяжения, основным линейным масштабом является капиллярно-гравитационный масштаб $\delta_g^\gamma = (\gamma/g)^{1/2}$, входящий в дисперсионное уравнение коротких волн на поверхности жидкости [9]. Влияние диссипативных факторов характеризует вязкокапиллярный масштаб $\delta_\gamma^\nu = \nu^2/\gamma$.

Временные масштабы образуют две группы. Одна из них содержит масштабы, определяемые только свойствами среды: капиллярно-гравитационный $\tau_g^\gamma = (\gamma/g^3)^{1/4}$ и вязкокапиллярный $\tau_\gamma^\nu = \nu^3/\gamma^2$. Другая группа включает временные масштабы, учитывающие размер капли: капиллярный $\tau_\gamma = \sqrt{D^3/\gamma}$, вязкий $\tau_\gamma^D = \nu D/\gamma$, — а также скорость ее движения: $\tau_U^D = D/U$.

Отношение масштабов длины и времени определяет характерный масштаб скорости $U_\gamma^\nu = \gamma/\nu$, который в ряде работ интерпретируется как капиллярно-вязкий масштаб скорости [11].

Таблица 1

Параметры жидкостей

Параметр	Спирт	Вода	Глицерин	Масло
ρ , г/см ³	0,80	1,00	1,26	0,93
γ , см ³ /с ²	27,5	74,0	49,2	35,5
ν , см ² /с	0,012	0,010	12,000	0,600
δ_g^γ , см	0,17	0,27	0,22	0,19
δ_γ^ν , см	$5,24 \cdot 10^{-6}$	$1,35 \cdot 10^{-6}$	2,93	0,01
τ_γ , с	0,07	0,04	0,05	0,06
τ_g^γ , с	0,013	0,017	0,015	0,014
τ_γ^D , с	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$	0,12	$8,4 \cdot 10^{-3}$
τ_γ^ν , с	$2,3 \cdot 10^{-9}$	$1,8 \cdot 10^{-10}$	0,7	$1,7 \cdot 10^{-4}$
U_γ , м/с	23,00	74,00	0,04	0,60
Bo	8,9	3,3	5,0	6,9
Oh	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	2,4	0,14

Отношения диаметра капли к линейным масштабам определяют безразмерные комплексы — числа Бонда $Bo = D^2/(\delta_g^\gamma)^2 = gD^2/\gamma$ и Онезорге $Oh = \sqrt{\delta_\gamma^\nu/D} = \nu/\sqrt{\gamma D}$. В силу малости скорости капли U непосредственно после отрыва влияние других безразмерных чисел (Рейнольдса $Re = UD/\nu$ и Фруда $Fr = U^2/(gD)$) не анализируется.

Характерные масштабы времени и длины для одной жидкости и однотипные масштабы для разных жидкостей различаются на несколько порядков (табл. 1), что свидетельствует о сложности протекающих процессов.

Среди линейных размеров, зависящих только от физических свойств жидкости, наибольшее значение имеет капиллярно-гравитационный масштаб δ_g^γ , на несколько порядков превышающий вязкокапиллярный масштаб δ_γ^ν .

Среди временных параметров наибольшее значение имеет масштаб τ_g^γ , на восемь порядков превышающий масштаб τ_γ^ν . Минимальный временной масштаб, обусловленный поверхностным натяжением и вязкостью, имеет вода ($\tau_\gamma^D = 67$ мкс), у других жидкостей с ростом вязкости данный параметр увеличивается (для масла $\tau_\gamma^D = 8,4$ мс, для глицерина $\tau_\gamma^D = 120$ мс).

Среди определяющих безразмерных комбинаций в условиях данного эксперимента наиболее существенно меняется число Онезорге (на два порядка), в то время как значения числа Бонда различаются только в два раза.

Существенные различия значений пространственных и временных масштабов (см. табл. 1) обусловлены влиянием нескольких независимых процессов, определяющих динамику отрыва: медленных макроскопических (механических) с масштабами δ_g^γ и τ_γ и быстрых короткодействующих (атомно-молекулярных), которым соответствуют масштабы δ_γ^ν и τ_γ^ν . Значения масштабов определяют размер области наблюдения, а также пространственное и временное разрешения регистрирующей аппаратуры. Методика данных экспериментов позволяет учитывать масштабы вплоть до $\delta_* = 10$ мкм, $\tau_* = 0,1$ мс.

2. Экспериментальная установка. Для получения одиночных капель и их последовательностей использовался дозатор с соплом диаметром 4 мм, от которого под действием силы тяжести отрывались капли диаметром $D = 5$ мм.

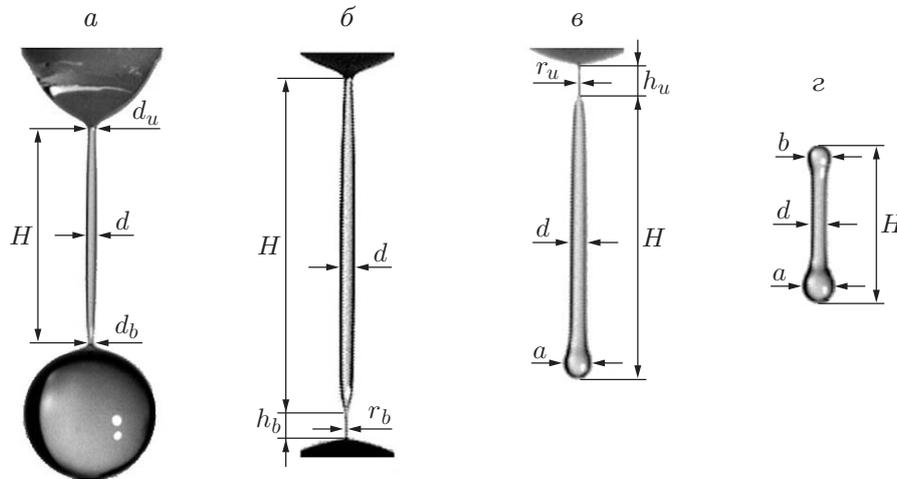


Рис. 1. Схемы течений:

a — отрыв капли от перемычки, b — отрыв капли от истонченного окончания перемычки, c — отрыв перемычки от маточной жидкости, d — стягивание свободной перемычки в “гантелю”

Видеозапись течения проводилась высокоскоростной камерой Optonics CR3000x2 (предельная скорость съемки 100 000 кадр/с, размеры матрицы и пикселя — $13,57 \times 13,68$ мм и 8 мкм). В опытах с водой и спиртом скорость съемки составляла 10 000 кадр/с, с глицерином и маслом — 14 084 кадр/с, размеры области съемки — $8,5 \times 8,5$ мм. Область наблюдений освещалась двумя световыми головками макроосветителя KL 2500.

Опыты проводились при комнатной температуре (20°C) и нормальном атмосферном давлении. В начале каждого опыта проводилась калибровка масштаба изображения при заданном разрешении.

Схема течения, включающая различные структурные компоненты, формирующиеся в процессе отрыва, приведена на рис. 1 (H — длина перемычки, d — диаметр в центре перемычки, d_u , d_b — диаметры верхнего и нижнего концов перемычки, h_b , r_b — высота и диаметр истонченного нижнего конца перемычки, h_u , r_u — высота и диаметр истонченного верхнего конца перемычки, a , b — диаметры скругленных концов (нижнего и верхнего) свободной перемычки). На начальной стадии вытекания в жидкости формировалась область отрицательной кривизны, которая отделяла растущую каплю от маточной жидкости и постепенно трансформировалась в перемычку (см. рис. 1, a). Капля всегда отрывалась от нижнего конца перемычки (см. рис. 1, b), момент ее отрыва принимался в качестве начала отсчета времени, отрицательные значения которого соответствовали предшествующей отрыву стадии формирования капли.

Отделение верхнего конца перемычки от маточной жидкости (см. рис. 1, c) происходило с некоторым запаздыванием, величина t_w которого была наименьшей для воды. Данный интервал был выбран для нормировки времени полного отрыва перемычки t_i остальных жидкостей. Под действием сил поверхностного натяжения отделившаяся перемычка, меняя форму (см. рис. 1, d), превращалась в маленькую каплю (сателлит).

В данной работе основное внимание уделяется анализу фаз медленных и быстрых изменений линейных размеров структурных элементов течения в процессе отрыва капли, последующего отделения верхнего конца перемычки от маточной жидкости (см. рис. 1, c) и трансформации свободной перемычки в сателлит.

Выбор видеок кадров проводился с учетом длительности фазы t_i/t_w полного отделения перемычки от маточной жидкости. Для спирта длительность этой фазы составляет

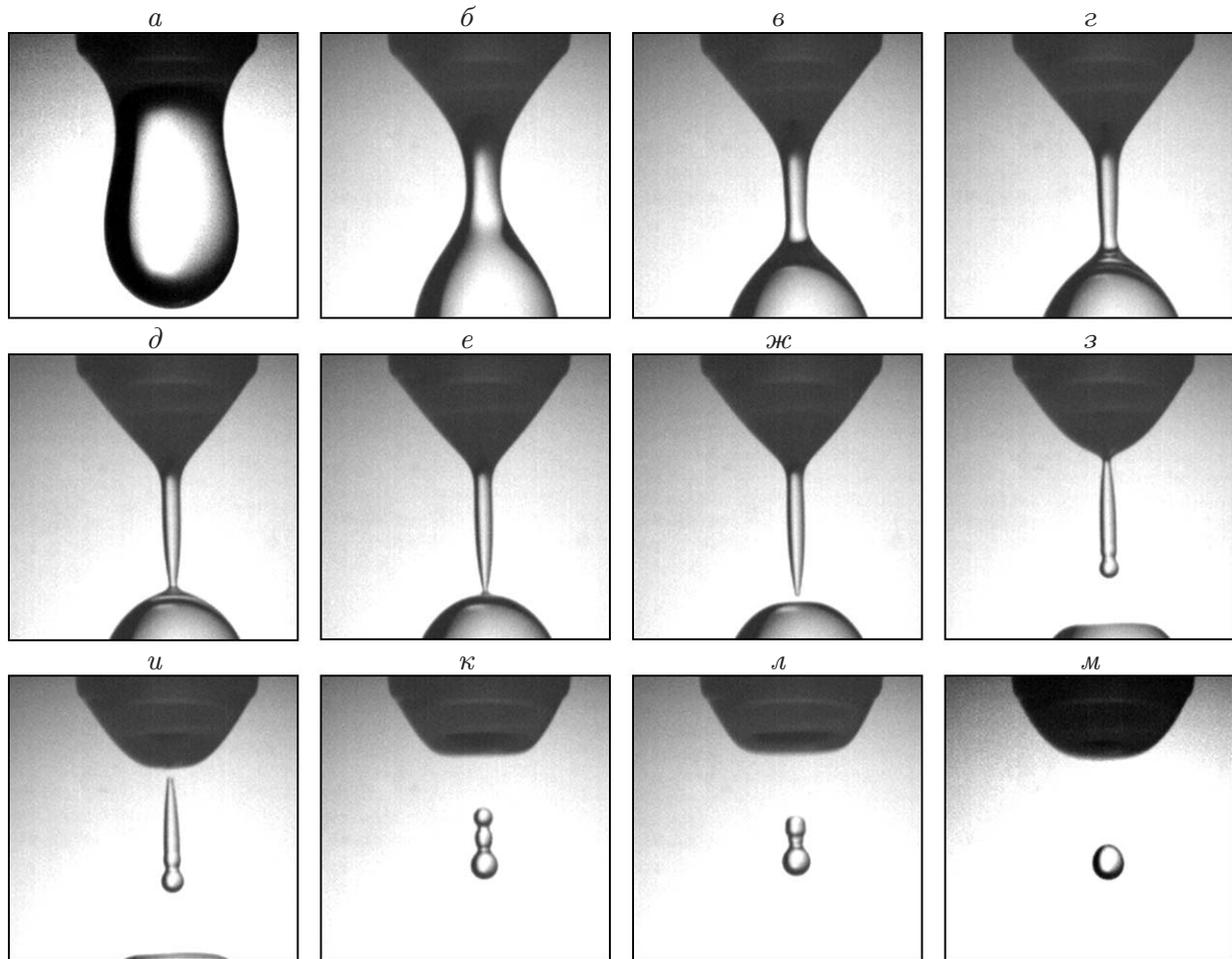


Рис. 2. Отрыв капли спирта:

$a - t = -33$ мс, $б - t = -4,9$ мс, $в - t = -2,2$ мс, $г - t = -1,4$ мс, $д - t = -0,5$ мс,
 $е - t = -0,3$ мс, $ж - t = 0$, $з - t = 1,1$ мс, $и - t = 1,6$ мс, $к - t = 2,7$ мс, $л - t = 3$ мс,
 $м - t = 10$ мс

$t_i/t_w = 2,7$, для воды $t_i/t_w = 1$, для глицерина $t_i/t_w = 2,25$, для масла $t_i/t_w = 3,2$. Таким образом, наиболее продолжительная фаза существования перемычки наблюдается у масла.

3. Отрыв капли спирта. Процесс отрыва капли спирта начинается с формирования на гладкой поверхности маточной жидкости вблизи дозатора участка с отрицательной кривизной — перетяжки, что свидетельствует о начале формирования капли (рис. 2, *a*). По мере опускания нижней кромки жидкости перетяжка утончается и превращается в слабokonическую перемычку, плавно сопрягающуюся с маточной жидкостью (рис. 2, *б*). Перемычка постепенно удлиняется и утончается (рис. 2, *в*).

К моменту $t = -1,4$ мс на верхней поверхности капли в области примыкания перемычки появляются концентрические кольцевые структуры, визуализирующие короткие капиллярные волны. Волны наблюдаются на вершине капли одновременно с резким изменением кривизны вследствие утончения перемычки (рис. 2, *г*).

Нижняя часть перемычки истончается быстрее, чем верхняя, и превращается в конический оголовок, касающийся конического выступа на верхнем полюсе капли. При этом область капиллярных волн расширяется (рис. 2, *д*). Перед отрывом на конце перемычки образуется заострение, примыкающее непосредственно к поверхности капли (рис. 2, *е*),

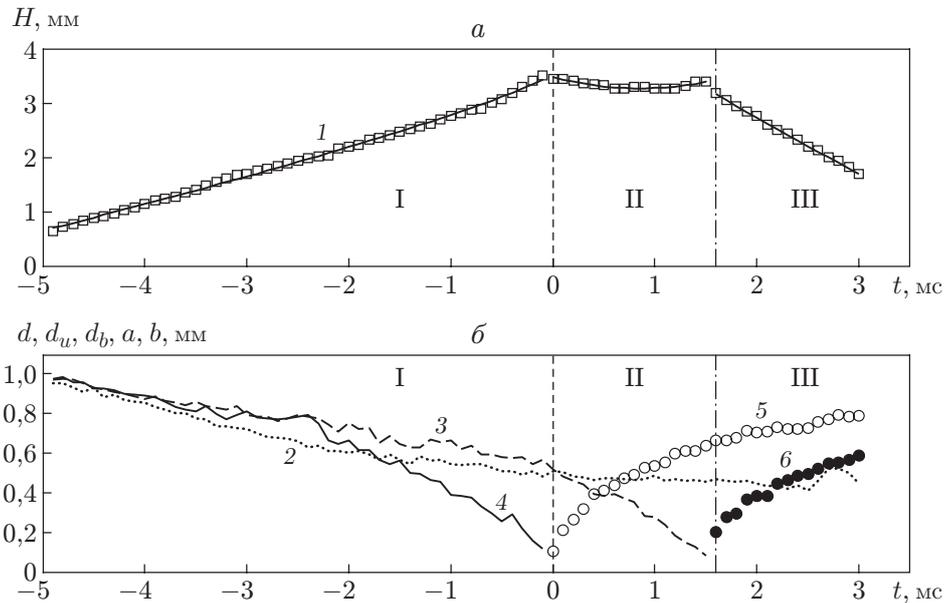


Рис. 3. Зависимости геометрических параметров от времени при отрыве капли спирта: I–III — характерные стадии эволюции капли (I — стадия отрыва капли, II — стадия отделения верхнего конца перемычки, III — стадия превращения полностью отделившейся перемычки в мелкую каплю — сателлит); 1 — H , 2 — d , 3 — d_u , 4 — d_b , 5 — a , 6 — b

по которому происходит отрыв перемычки от уплощающейся вершины капли (рис. 2,ж). Капля начинает осциллировать, на ее поверхности возникают новые группы коротких капиллярных волн.

После отрыва капли нижняя поверхность маточной жидкости, скругляясь, быстро поднимается. При этом под действием разнонаправленных движений на верхней части перемычки формируется заострение. Нижняя часть перемычки стягивается в сферический оголовок, отделенный перетяжкой от основной части (рис. 2,з).

Разнонаправленность движений поднимающейся поверхности маточной жидкости и остатка перемычки приводит к их разделению и образованию свободного жидкого тела сложной формы (рис. 2,и), которое быстро преобразуется в три связанные “бусины” (рис. 2,к), затем — в “гантелю” со сферическими оголовками разного диаметра (рис. 2,л) и, наконец, в осциллирующий шарик, падающий в следе за каплей (рис. 2,м). Отрыв перемычки сопровождался значительными осцилляциями маточной жидкости.

Геометрические параметры процесса, полученные в результате обработки видеоданных, приведены на рис. 3. Римскими цифрами отмечены характерные стадии эволюции капли. Для всех рассмотренных жидкостей получены аппроксимирующие функции и входящие в них эмпирические параметры (табл. 2).

На начальном участке длина перемычки H_I монотонно увеличивается с момента $t = -33$ мс до момента отрыва капли $t = 0$ (участок I кривой 1 на рис. 3,а). Зависимость $H_I(t)$ аппроксимируется степенной функцией вида $H_I = a_I(1+t/\tau_I)^{\alpha_I}$ (см. табл. 2). После отрыва капли остаток перемычки начинает уменьшаться (участок II кривой 1 на рис. 3,а).

Немонотонное изменение длины H_{II} свидетельствует о сложной динамике перемычки, которая истончается на верхнем конце и при этом удлиняется. Одновременно нижний заостренный конец перемычки скругляется под действием сил поверхностного натяжения. Зависимость длины от времени аппроксимируется суммой двух экспонент, показатели которых имеют различные знаки (см. табл. 2).

Таблица 2

Аппроксимирующие функции и входящие в них эмпирические параметры капли и перемычки в процессе их трансформации

Параметр	Спирт	Вода	Глицерин	Масло
$H_I = a_I(1 + t/\tau_I)^{\alpha_I}$				
a_I , мм	3,4	3,0	7,9	8,9
τ_I , мс	7,0	3,0	14,5	23,4
α_I	1,3	1,5	1,0	1,4
$H_{II} = \sum_2 a_i \exp(t/\tau_i)$ $H_{II} = a_{II}(1 + t/\tau_{II})^{\alpha_{II}}$				
a_1 , мм	3,40	0,25	—	—
a_2 , мм	0,04	2,50	—	—
a_{II} , мм	—	—	6,8	7,9
τ_1 , мс	-8,6	-0,2	—	—
τ_2 , мс	0,57	4,70	—	—
τ_{II} , мс	—	—	0,9	6,4
α_{II}	—	—	-0,2	-0,3
$H_{III} = a_{III}(1 - t/\tau_{III})$				
a_{III} , мм	4,8	4,8	7,5	9,4
τ_{III} , мс	4,6	1,6	3,4	6,3
$d = a_d(1 + t/\tau_d)^{\alpha_d}$				
a_d , мм	0,51	0,44	0,37	0,43
τ_d , мс	7,0	2,5	4,2	9,0
α_d	-0,57	-0,36	-0,05	-0,15
$a = a_a(1 + t/\tau_a)^{\alpha_a}$				
a_a , мм	0,15	0,25	0,34	0,40
τ_a , мс	0,045	0,100	1,000	0,200
α_a	0,40	0,37	0,56	0,24
$b = a_b(t/\tau_b - 1)^{\alpha_b}$				
a_b , мм	0,58	0,52	0,53	0,67
τ_b , мс	1,50	0,55	1,40	2,20
α_b	0,40	0,45	0,15	0,44

На кратковременной стадии процесса отделения перемычки от маточной жидкости ее длина резко уменьшается на величину $\Delta H = 0,2$ мм. Далее длина H_{III} отделившегося жидкого тела (остатка перемычки) уменьшается по линейному закону (участок III кривой 1 на рис. 3,а).

Диаметр в центре перемычки d уменьшается со временем (кривая 2 на рис. 3,б), его осредненная зависимость описывается степенной функцией на всех стадиях, за исключением последней стадии, на которой формируется сателлит. Диаметр верхнего конца перемычки d_u на участке I уменьшается медленнее, чем диаметр d (кривая 3 на рис. 3,б), а на участке II — существенно быстрее. До момента $t = 2,3$ мс диаметр нижнего конца перемычки d_b уменьшается плавно, а затем — резко, что приводит к отделению капли (кривая 4 на рис. 3,б). Диаметры d_u и d_b в контактных областях меняются со временем нерегулярно с отклонениями от средних значений, достигающими 0,05 мм.

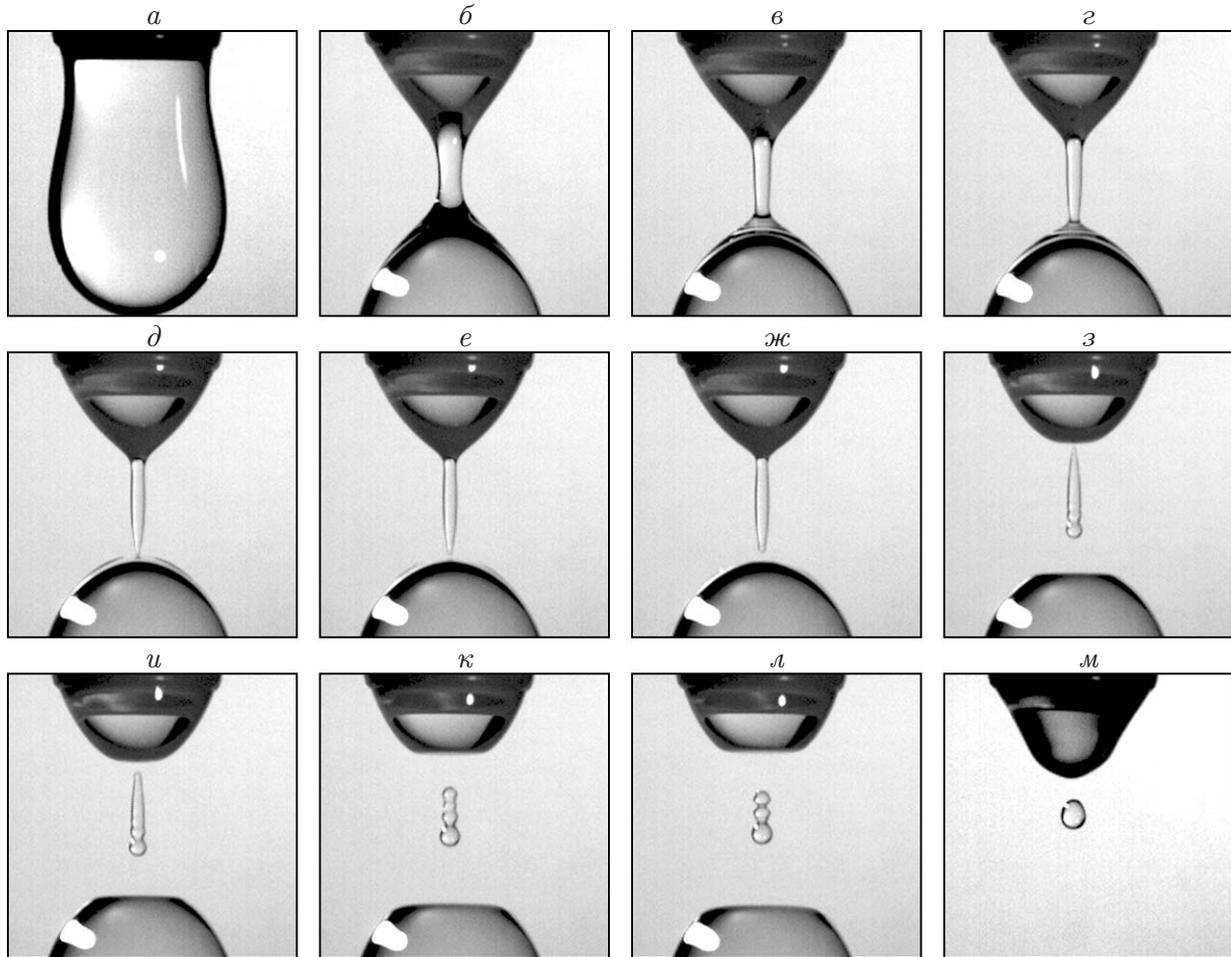


Рис. 4. Отрыв капли воды:

$a - t = -1380$ мс, $б - t = -1,8$ мс, $в - t = -0,8$ мс, $г - t = -0,5$ мс, $д - t = -0,2$ мс,
 $е - t = -0,1$ мс, $ж - t = 0$, $з - t = 0,5$ мс, $и - t = 0,6$ мс, $к - t = 0,7$ мс, $л - t = 0,8$ мс, $м - t = 10$ мс

Диаметры нижнего и верхнего сферических оголовков оторвавшегося остатка перемычки увеличиваются со временем, испытывая нерегулярные флуктуации (средняя амплитуда равна 0,025 мм) с переменным периодом $2,0 \div 0,6$ мс (кривая 5 на рис. 3,б).

Немонотонное изменение размеров a и b указывает на существование высокочастотных колебаний и волн, сопровождающих отрыв капли, во всех структурных элементах течения.

В целом на временных зависимостях можно выделить участки медленного изменения параметров капли и перемычки (формирование капли, удлинение перемычки, сжатие остатка перемычки с характерным временем не менее 4 мс) и небольшие участки быстрого изменения этих параметров (образование заострения, формирование капиллярных волн с характерным временным масштабом не более 0,03 мс).

4. Отрыв капли воды. Фаза отделения капли воды начинается с формирования перетяжки (рис. 4,а), которая постепенно трансформируется в перемычку. На начальной стадии поверхность жидкости всюду гладкая, переходы между маточной жидкостью и каплей плавные (см. рис. 4,а).

Постепенно нижняя часть конической перемычки утончается, одновременно нарушается плавность перехода к основной капле (рис. 4,б). Затем в области контакта перемычки

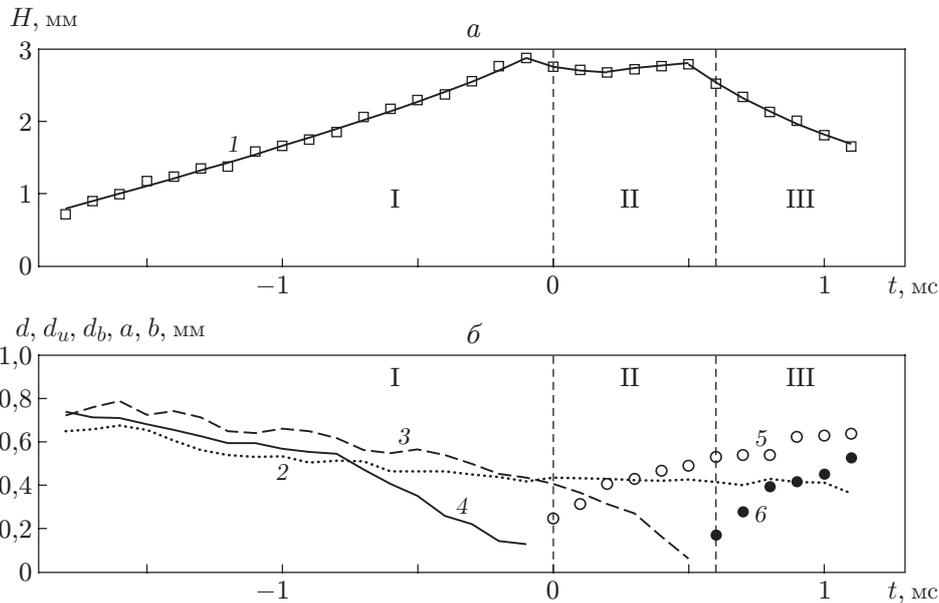


Рис. 5. Зависимости геометрических параметров от времени при отрыве капли воды: I–III — характерные стадии эволюции капли (I — стадия отрыва капли, II — стадия отделения верхнего конца перемычки, III — стадия превращения полностью отделившейся перемычки в мелкую каплю — сателлит); 1 — H , 2 — d , 3 — d_u , 4 — d_b , 5 — a , 6 — b

и капли возникает группа сбегаящих капиллярных волн, которые визуализируются светлыми дугообразными полосами (рис. 4, в). Со временем толщина перемычки уменьшается, а ее нижняя часть утончается, картина волнового поля усложняется (рис. 4, г). Нижний конец перемычки, контактирующий с опускающейся каплей, начинает заостряться (рис. 4, д), в целом сохраняя форму (рис. 4, д, е). Непосредственно перед отрывом конец перемычки истончается и оказывается связанным с опускающейся каплей тонкой короткой нитью, различной при большом увеличении (см. рис. 4, е). После отрыва капли нить быстро вытягивается в скругляющуюся вершину перемычки, верх капли уплощается (рис. 4, ж).

Освобожденная от капли поверхность жидкости округляется и поднимается вверх. При этом верхний конец перемычки заостряется (рис. 4, з), ее боковая поверхность становится волнистой, а нижняя часть превращается в сферический оголовок. Перед разделением верхняя часть перемычки также превращается в тонкую нить диаметром 0,06 мм и длиной 0,1 мм (см. рис. 4, з).

После отделения перемычки нижняя кромка маточной жидкости уплощается. На отделившейся перемычке возникает последовательность возмущений (периодических утолщений с шагом 0,35 мм (рис. 4, у), которые превращаются в “четки” из четырех (рис. 4, к), а затем — из трех капель (рис. 4, л). Далее перемычка продолжает стягиваться и превращается в одиночную микрокаплю, имеющую сложную изменяющуюся форму (рис. 4, м).

В процессе отрыва капли воды, как и в случае спирта, выделяются три стадии (рис. 5), временные границы которых определяются моментами отделения основной капли ($t = 0$), отделения верхнего конца перемычки ($t = 0,6$ мс) и начала ее стягивания в сателлит ($t = 1,2$ мс). На стадии I (менее продолжительной, чем у спирта) увеличение длины H_1 описывается степенной функцией (см. табл. 2), максимальная длина достигается за 0,1 мс до момента отделения капли. Далее капля оказывается связанной с перемычкой тонкой короткой нитью. После отрыва капли нить вытягивается в скруглившийся оголовок.

Длина перемычки H_{II} на участке II (см. рис. 5, *a*) до момента ее отделения от маточной жидкости меняется немонотонно, продолжительная фаза уменьшения длины перемычки сменяется кратковременной фазой роста. Данный участок аппроксимируется суммой двух экспонент (см. табл. 2).

Отделение вершины перемычки от маточной жидкости (как и отрыв капли от перемычки) также происходит с образованием короткой (0,12 мм) нити. На заключительной стадии длина перемычки H_{III} уменьшается по линейному закону (см. табл. 2).

Диаметры перемычки в ее середине d и на верхнем конце d_u уменьшаются на всем интервале наблюдения, при этом их значения нерегулярно меняются (кривые 2, 3 на рис. 5, *b*) с амплитудой до 0,03 мм при $-1,6 \text{ мс} < t < -0,5 \text{ мс}$.

Диаметр нижнего конца перемычки d_b (кривая 4 на рис. 5, *b*), как и d_u , сначала ($t < -0,8 \text{ мс}$) уменьшается сравнительно медленно, а после образования конического участка на нижнем конце перемычки (см. рис. 4, *z-e*) — ускоренно. После отрыва капли на нижнем конце перемычки формируется сферический оголовок, диаметр a которого монотонно растет (кривая 5 на рис. 5, *b*). Отделившаяся от маточной жидкости вершина перемычки также стягивается в сферический оголовок диаметром b (кривая 6 на рис. 5, *b*).

Большое значение коэффициента поверхностного натяжения воды обуславливает качественные и количественные различия картин отрыва капель воды и спирта.

Нерегулярное изменение размеров капли и перемычки свидетельствует о сложной динамике всех структурных элементов течения в маточной жидкости, оторвавшейся капле и сателлите. В ряде случаев интенсивно осциллирующий сателлит выбрасывает вверх микросателлит, который долетает до маточной жидкости и взаимодействует с ней [12].

5. Отрыв капли глицерина. Картины течения, возникающие при отрыве капли глицерина, имеющего максимальную среди исследуемых жидкостей вязкость, показаны на рис. 6. Видно, что при сохранении последовательности процессов первоначальная перетяжка (см. рис. 6, *a*) в течение 88 мс трансформируется в тонкую цилиндрическую перемычку, существенно более длинную, чем у воды или спирта (см. рис. 6, *b*).

На начальной стадии длина перемычки увеличивается линейно (рис. 7, *a*). Затем ее нижняя часть превращается в тонкую нить с начальным диаметром 0,08 мм (см. рис. 6, *d*), а длина основной (утолщенной) части перемычки H_{II} резко уменьшается на 0,42 мм (конец участка I и начало участка II кривой 1 на рис. 7, *a*), после чего уменьшается по степенному закону (табл. 2).

В фазе формирования заострения нижнего конца перемычки на вершине капли наблюдается группа кольцевых капиллярных волн, так же как и в случае маловязких жидкостей (см. рис. 6, *b-z*).

Длина связывающей нити, равная 0,45 мм (кривая 7 на рис. 7, *b*), быстро (со скоростью 2,9 м/с) растет и к моменту отрыва капли ($t = 0$) достигает 0,87 мм (см. рис. 6, *e*). При этом ее начальный диаметр, равный 0,09 мм, уменьшается (скорость уменьшения равна 0,7 м/с) и в момент отрыва капли составляет 0,04 мм (рис. 6, *ж* и кривая 8 на рис. 7, *b*). Время отделения нижнего конца перемычки ($t = 71 \text{ мкс}$) определяется с точностью до интервала между кадрами видеосъемки.

Верхний конец перемычки перед разрывом также истончается в нить (см. рис. 6, *ж-и*), длина которой, равная 0,4 мм, быстро увеличивается и к моменту ее отделения от маточной жидкости достигает 1,1 мм (скорость удлинения равна 1,9 м/с). Появление нити сопровождается резким уменьшением (за время $t < 70 \text{ мкс}$) длины основной перемычки на 0,7 мм (разрыв в конце участка II кривой 1 на рис. 7, *a*), после чего она уменьшается по линейному закону. После отрыва перемычка стягивается сначала в “гантелю” (см. рис. 6, *к, л*), а затем — в шар (см. рис. 6, *м*).

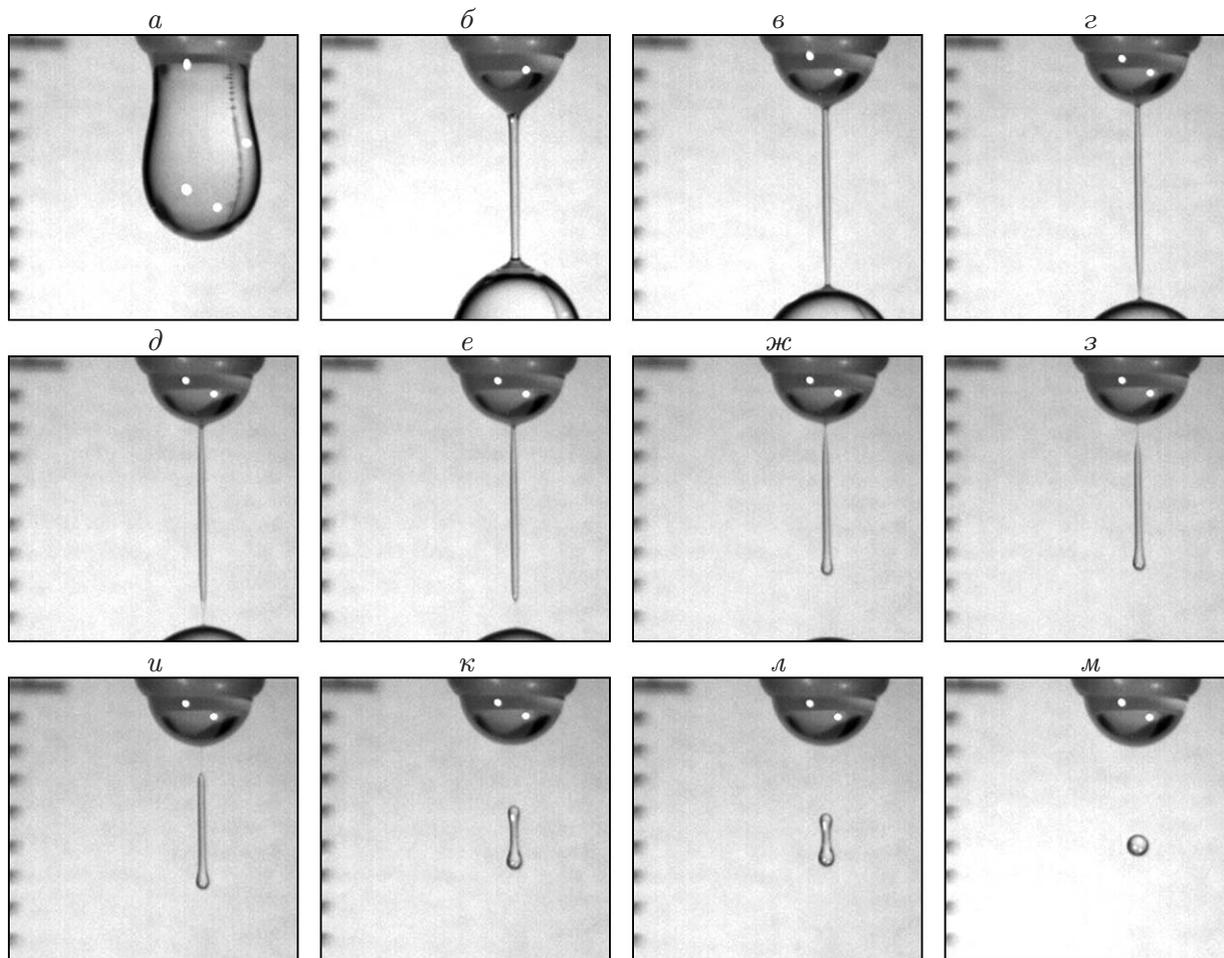


Рис. 6. Отрыв капли глицерина с образованием истонченных участков:
 $a - t = -92,3$ мс, $б - t = -4,05$ мс, $в - t = -1,77$ мс, $г - t = -0,64$ мс, $д - t = -0,21$ мс, $е - t = 0$, $ж - t = 0,92$ мс, $з - t = 1,14$ мс, $и - t = 1,4$ мс, $к - t = 2,27$ мс, $л - t = 2,48$ мс, $м - t = 7,1$ мс

Диаметр центральной части перемычки d быстро меняется (кривая 2 на рис. 7,б); его сглаженное значение уменьшается до значения $d = 0,3$ мм при $t = -0,5$ мс по степенному закону (см. табл. 2), а затем быстро увеличивается до значения $d = 0,47$ мм. Реальные значения d отклоняются от сглаживающей функции на 0,02 мм, максимальные отклонения соответствуют частотам 0,9 и 5,3 кГц.

Диаметр верхнего участка перемычки d_u (кривая 3 на рис. 7,б) медленно уменьшается со временем. Диаметр нижнего участка d_b (кривая 4 на рис. 7,б) уменьшается одновременно с диаметром верхнего участка до момента $t = 1$ мс, после чего формируются заострение и истонченная нить, изменение диаметра которой описывается кривой 8 на рис. 7,б.

После отрыва капли на нижней части перемычки образуется утолщение диаметром a , который далее немонотонно увеличивается со временем (кривая 5 на рис. 7,б). Диаметр верхней части остатка перемычки b (кривая 6 на рис. 7,б) также увеличивается, оставаясь меньше диаметра утолщения a .

Соединительная нить между перемычкой и жидкостью диаметром 0,09 мм быстро (в течение 213 мкс) удлиняется (кривая 9) и утончается до значения, равного 0,04 мм (кривая 10).

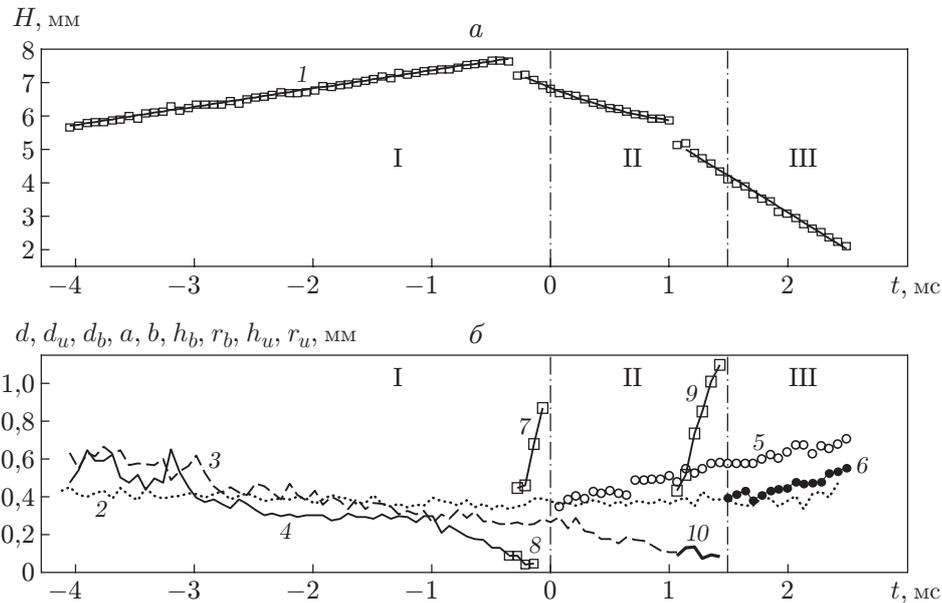


Рис. 7. Зависимости геометрических параметров от времени при отрыве капли глицерина:

I–III — характерные стадии эволюции капли (I — стадия отрыва капли, II — стадия отделения верхнего конца перемычки, III — стадия превращения полностью отделившейся перемычки в мелкую каплю — сателлит); 1 — H , 2 — d , 3 — d_u , 4 — d_b , 5 — a , 6 — b , 7 — h_b , 8 — r_b , 9 — h_u , 10 — r_u

Как и в предыдущих опытах, в процессе отрыва капли глицерина прослеживаются стадии медленного и быстрого изменения геометрических размеров, в частности при разрыве концов перемычки (кривая 1 на рис. 7,а) или при образовании новых структурных элементов — нитей (кривые 7, 9 на рис. 7,б). Скорость удлинения нитевидных элементов в десятки раз больше масштаба скорости U_γ^ν (см. табл. 1). Времена жизни и размеры нитевидных элементов во много раз превышают аналогичные параметры для воды. Размеры структурных элементов нерегулярно меняются.

6. Отрыв капли масла. Характер отрыва капли вязкой жидкости сохраняется и при отрыве капли подсолнечного масла.

Перетяжка на контуре жидкости вблизи среза дозатора (рис. 8,а) постепенно трансформируется в слабоконическую перемычку (рис. 8,б). На вершине висящей капли в области контакта с перемычкой также наблюдается группа коротких капиллярных волн.

Постепенно в нижней части перемычки образуется заострение с большей кривизной (рис. 8,в,з), чем у спирта или воды. В интервале $-1,06 \text{ мс} < t < -0,35 \text{ мс}$ нижний конец перемычки вытягивается в тонкую нить (рис. 8,з,д), время жизни которой составляет 0,21 мс (кривая 7 на рис. 9). Аналогичная картина течения наблюдалась при выдавливании капли вязкой жидкости из горизонтально расположенного капилляра [7].

После отрыва капли (рис. 8,е) нижний конец перемычки преобразуется в сферический оголовок (рис. 8,ж). Нижняя поверхность маточной жидкости резко подтягивается к дозатору, оставаясь связанной с перемычкой тонкой нитью (рис. 8,з,и). После разрыва нити верхний конец также скругляется, и перемычка принимает форму стягивающейся “гантели” (рис. 8,к,л). Окончательной формой перемычки является гладкий осциллирующий овоид (рис. 8,м).

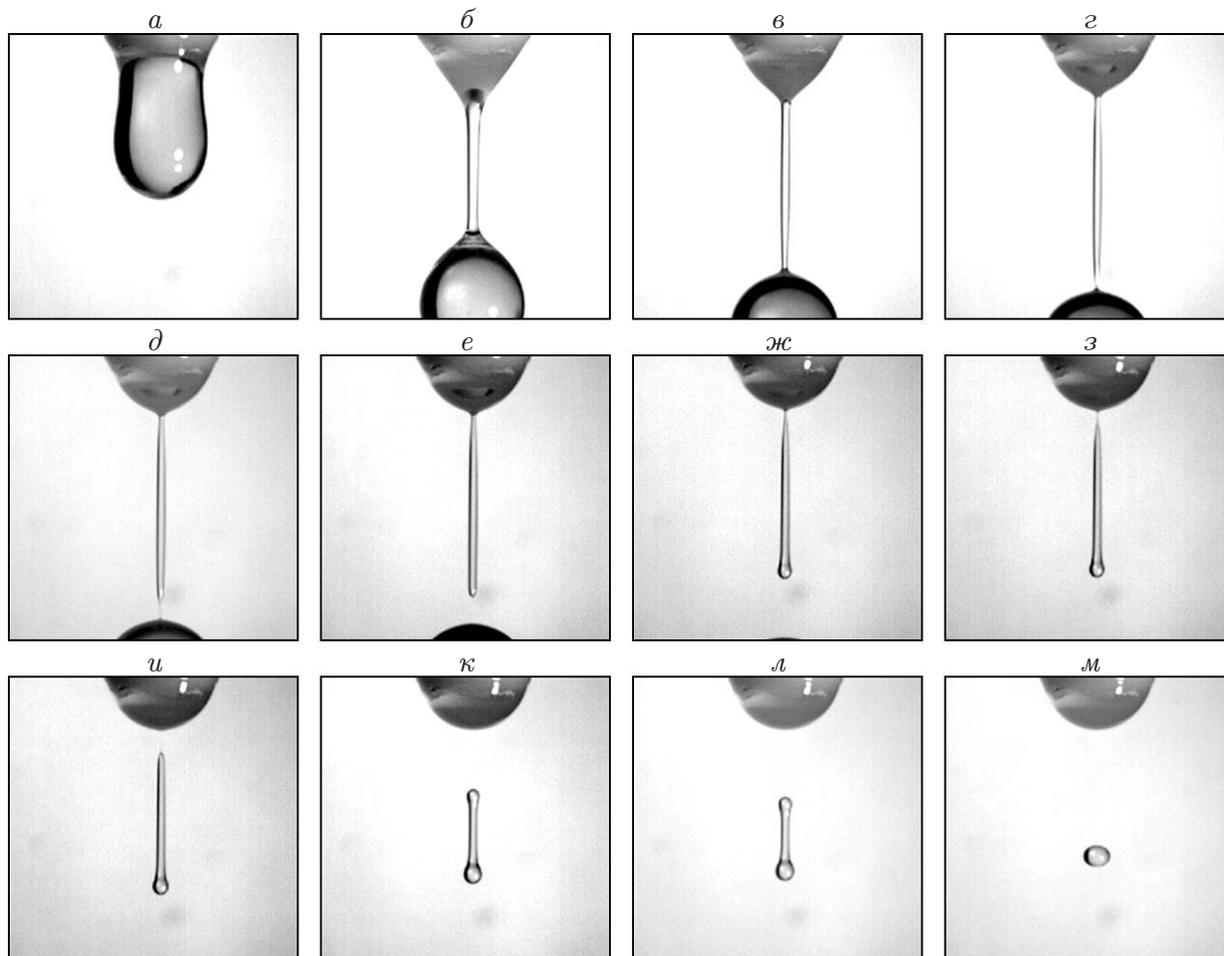


Рис. 8. Отрыв капли подсолнечного масла с образованием истонченных участков:
 $a - t = -71$ мс, $b - t = -6,39$ мс, $в - t = -2,84$ мс, $г - t = -1,06$ мс, $д - t = -0,35$ мс,
 $e - t = 0$, $ж - t = 1,42$ мс, $з - t = 1,77$ мс, $и - t = 2,13$ мс, $к - t = 3,55$ мс, $л - t = 3,9$ мс, $м - t = 7,10$ мс

Временные зависимости размеров структурных элементов показаны на рис. 9. Как и в случае других жидкостей, в процессе отрыва капли можно выделить три стадии, границами которых являются моменты отрыва капли (стадия I), отделения перемычки (стадия II), свободного падения и изменения формы остатка перемычки (стадия III).

На стадии I перемычка ускоренно удлиняется (кривая 1 на рис. 9, б). Ступенька на кривой 1 ($\Delta H = 0,8$ мм) соответствует изменению формы перемычки и образованию быстроудлиняющейся соединительной нити (кривая 7 на рис. 9, б), разрыв которой означает полный отрыв капли ($t = 0$). Максимальные значения диаметра и длины нити равны 0,09 и 0,86 мм соответственно, скорость удлинения составляет 1,4 м/с.

После отрыва капли длина перемычки H_{II} монотонно уменьшается до момента, в который на верхнем конце начинает формироваться вторая нить (кривая 9 на рис. 9, б), затем она скачкообразно уменьшается на величину $\Delta H = 0,4$ мм. На последней стадии (после отделения от маточной жидкости) скорость уменьшения длины перемычки существенно возрастает: линейная зависимость $H_{III}(t)$ убывает значительно быстрее слабонелинейной функции $H_{II}(t)$, несмотря на приблизительно одинаковые постоянные времени τ_{II} и τ_{III} (см. табл. 2).

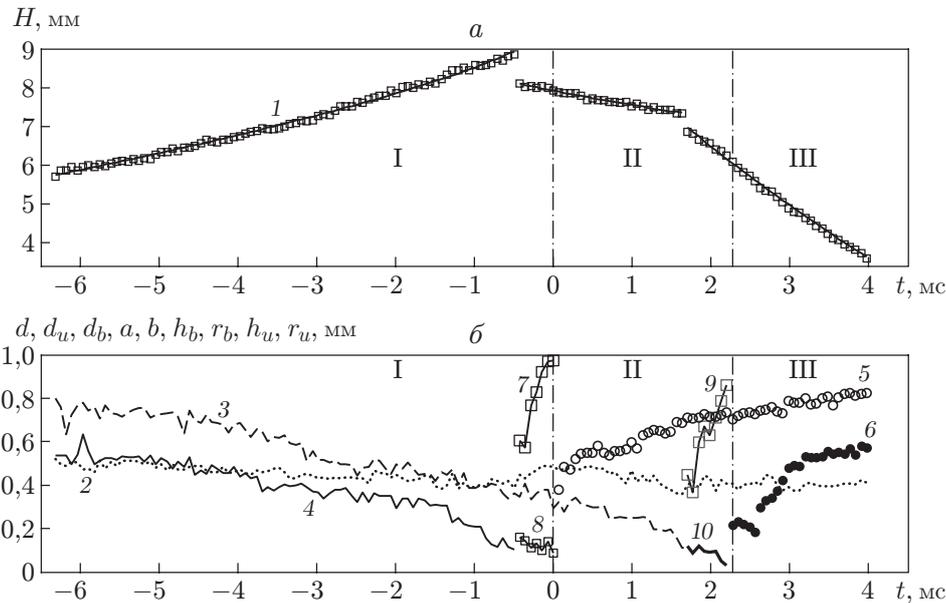


Рис. 9. Зависимости геометрических параметров от времени при отрыве капли масла: I–III — характерные стадии эволюции капли (I — стадия отрыва капли, II — стадия отделения верхнего конца перемычки, III — стадия превращения полностью отделившейся перемычки в мелкую каплю — сателлит); 1 — H , 2 — d , 3 — d_u , 4 — d_b , 5 — a , 6 — b , 7 — h_b , 8 — r_b , 9 — h_u , 10 — r_u

Диаметр центральной части перемычки d (кривая 2 на рис. 9, б) при $t < -0,5$ мс в среднем монотонно уменьшается в соответствии со степенным законом (см. табл. 2), а при появлении удлиняющейся нити (скорость удлинения 0,5 м/с) (кривая 9 на рис. 9, б) сравнительно быстро увеличивается вплоть до момента отрыва капли, после чего также быстро уменьшается (участок $0,5 \text{ мс} < t < 1,6 \text{ мс}$). На заключительной стадии среднее значение диаметра d составляет 0,4 мм, изменение d во времени не превышает 0,05 мм (кривая 2 на рис. 9, б).

На всех стадиях процесса отрыва капли масла диаметры верхней d_u и нижней d_b частей перемычки уменьшаются, испытывая нерегулярные осцилляции с амплитудой, приближенно равной 0,03 мм (кривые 3, 4 на рис. 9, б). Диаметры нитей в нижней и верхней частях перемычки (кривые 7, 9) меняются в диапазонах $0,16 \div 0,09$ и $0,12 \div 0,03$ мм соответственно.

На стадии свободного падения концы перемычки сворачиваются в сферические оголовки с диаметрами a и b (кривые 5, 6 на рис. 9, б). В процессе эволюции диаметры оголовков колеблются относительно средних значений.

В процессе отрыва капли масла, так же как и при отрыве капли глицерина, стадии быстрого и медленного изменения геометрических параметров течения четко выражены, однако в данном случае имеет место бóльшая немонотонность изменения геометрии нитевидных элементов (см. рис. 9). При многократном повторении опытов основные результаты воспроизводятся с высокой степенью детализации.

Вариации размеров структурных элементов, являющиеся следствием влияния течений, которые возникают при падении капли в жидкость [13] и существование которых допускалось еще в конце XIX в. [14], играют важную роль в процессах формирования акустического излучения при падении капли в жидкость. Их действие проявляется в нерегулярных движениях подводных газовых полостей, которые отрываются и вновь примыкают

к эволюционирующей каверне, излучая акустические сигналы [15]. Влияние скрытых течений на процессы отрыва капли, изменения формы сателлитов и маточной жидкости до сих пор не изучено.

Заключение. Проведенные опыты показали, что процесс отрыва под действием силы тяжести капля жидкостей (спирт, вода, глицерин, масло), висящих в покоящейся воздушной среде, включает продолжительные стадии медленного и кратковременные стадии быстрого изменения геометрических параметров течения, обусловленные действием макроскопических и атомно-молекулярных сил.

Капли маловязких жидкостей (спирт, вода) отделяются непосредственно от перемычки или от быстроформирующейся короткой нити. Перед отделением от перемычки на поверхности капли наблюдаются короткие капиллярные волны. Отделившаяся перемычка трансформируется в цепочку мелких капель (“бусин”), а затем — в интенсивно осциллирующую каплю — сателлит.

Концы перемычек вязких жидкостей истончаются в нитевидные элементы переменной толщины. На конечной стадии освободившаяся перемычка стягивается в осциллирующий сателлит.

Вариации размеров структурных элементов, отмечаемые на отдельных стадиях процесса, свидетельствуют о существовании внутренних течений, в настоящее время экспериментально не изученных.

Авторы выражают благодарность Г. М. Чернявскому и И. В. Черному за внимание к работе и ее обсуждение.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Tate T.** On the magnitude of a drop of liquid formed under different circumstances // *Philos. Mag. Ser. 4.* 1864. V. 27, N 181. P. 176–180.
2. **Sazhin S. S., Kristyadi T., Abdelghaffar W. A., Heikal M. R.** Models for fuel droplet heating and evaporation: comparative analysis // *Fuel.* 2006. V. 85. P. 1613–1630.
3. **Notz P. K., Chen A. U., Basaren O. A.** Satellite drops: unexpected dynamics and change of scaling during pinch off // *Phys. Fluids.* 2001. V. 13, N 3. P. 549–552.
4. **Eggers J.** Drop formation — an overview // *Z. angew. Math. Mech.* 2005. Bd 85, N 6. S. 400–410.
5. **Chang B., Nave G., Jung S.** Drop formation from a wettable nozzle // *Comm. Nonlinear Sci. Numer. Simulat.* 2012. V. 17, N 5. P. 2045–2051.
6. **Dietrich N., Mayoufi N., Poncin S., Li H.-Z.** Experimental investigation of bubble and drop formation at submerged orifices // *Chem. Papers.* 2013. V. 67, N 3. P. 313–325.
7. **Kowalewski T. A.** On the separation of droplets from a liquid jet // *Fluid Dynamics Res.* 1996. V. 17. P. 121–145.
8. **Прохоров В. Е., Чашечкин Ю. Д.** Динамика отрыва одиночных капель в воздушной среде // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа.* 2014. № 4. С. 109–118.
9. **Ландау Л. Д.** Гидродинамика. Теоретическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М.: Наука, 1986. Т. 6.
10. **Чашечкин Ю. Д.** Дифференциальная механика жидкостей: согласованные аналитические, численные и лабораторные модели стратифицированных течений // *Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана. Сер. Естеств. науки.* 2014. № 6. С. 67–95.
11. **Thoroddsen S. T., Etoh T. G., Takehara K.** High-speed imaging of drops and bubbles // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2008. V. 40. P. 257–285.
12. **Чашечкин Ю. Д., Прохоров В. Е.** Отрыв одиночной капли воды // *Докл. АН.* 2014. Т. 454, № 1. С. 31–36.

13. **Prosperetti A., Oguz H. N.** The impact of drops on liquid surfaces and the underwater noise of rain // Annu. Rev. Fluid Mech. 1993. V. 25. P. 577–602.
14. **Worthington A. M.** The splash of the drop. N. Y.; London: E. and J. B. Young and Co., 1895. (Ser. The romance of science).
15. **Прохоров В. Е., Чашечкин Ю. Д.** Генерация звука при падении капли на поверхность воды // Акуст. журн. 2011. Т. 57, № 6. С. 792–803.

*Поступила в редакцию 19/II 2015 г.,
в окончательном варианте — 2/IV 2015 г.*
