———— ФИЗИКА ——

УДК 532.5

ЭВОЛЮЦИЯ ФОРМЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ КАВЕРН ИМПАКТА СВОБОДНО ПАДАЮЩЕЙ КАПЛИ

© 2022 г. Ю. Д. Чашечкин^{1,*}, А. Ю. Ильиных^{1,**}

Представлено академиком РАН В.Ф. Журавлевым 23.09.2021 г. Поступило 26.09.2021 г. После доработки 26.09.2021 г. Принято к публикации 20.10.2021 г.

Методом скоростной видеорегистрации прослежена эволюция формы последовательных каверн, сопровождающих слияние свободно падающей капли с покоящейся жидкостью. Визуализация течения выполнена методом "темного поля" в боковом ракурсе (линия визирования лежит на свободной поверхности), а также "на просвет". В первом случае светодиодные источники устанавливались сверху и сбоку прозрачной кюветы, во втором к осветителям добавлен прожектор, расположенный позади бассейна. Высокоразрешающая методика эксперимента впервые позволила зарегистрировать осцилляции дна вторичных каверн и визуализировать группы газовых пузырьков, в том числе "вмороженных", воспроизводящих начальную форму быстро заполняющейся второй каверны, которая формируется при погружении всплеска. Следующая мелкая каверна образуется после полного растекания всплеска. Последнюю каверну формирует возвращающаяся капля, ранее выброшенная с вершины всплеска. Повышение скорости убывания глубины коллапсирующих каверн связывается с конверсией доступной потенциальной поверхностной энергии при сокращении площади свободной поверхности жидкости.

Ключевые слова: капля, каверна, всплеск, волны, газовые пузырьки **DOI:** 10.31857/S2686740021060055

Наблюдаемый рост интереса к исследованию течений, порождаемых в покоящейся жидкости упавшей каплей, которые начали систематически наблюдаться еще в конце XIX века [1], обусловлен совместным влиянием ряда факторов. Изящные формы быстро меняющихся структурных компонентов течений – собственно капли, каверны, венца, активно воспроизводятся в рисунках, скульптурах, ювелирных украшениях. Научный интерес представляет изучение механизмов переноса вещества, импульса и энергии через контактную поверхность жидкость-газ. Прикладной интерес обусловлен расширением областей применения капельных технологий в химической, нефте- и биохимической, фармацевтической и других отраслях промышленности.

Капельные течения играют важную роль в динамике окружающей среды — атмосферы и гидросферы. В процессе слияния одиночной капли с жидкостью, в воздух выбрасываются мелкие капельки с вершин тонких струек на границе области первичного контакта и кромке венца, а также более крупные капли с вершины всплеска (кумулятивной струи), и последующей более тонкой центральной струйки — стримера. Недавние опыты показали, что мелкие капли выбрасываются циклически [2]. Исследования геометрии каверны, всплеска и капель, вылетающих с его вершины, выполнены в [3, 4].

Вместе с каплями в атмосферу попадают минеральные и органические вещества. Минеральные остатки высохших капель выносятся в высокие слои атмосферы, где становятся центрами конденсации, играющими важную роль в образовании облаков и формировании погоды [5]. Переносимые ветром на большие расстояния микробы и вирусы могут вызывать болезни растений и животных, способствовать распространению опасных инфекций [6].

Одновременно с выбросом брызг в атмосферу, падающие капли активизируют процессы переноса внутрь жидкости газов, как растворенных в падающих каплях, так и в форме погружающихся пузырьков. Эксперименты с подсветкой в оптическом и рентгеновском диапазонах показали, что в процессе слияния каплю отделяет от принимающей жидкости тонкая газовая прослойка в форме диска [7]. В зависимости от условий опы-

¹ Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия

^{*}E-mail: chakin@ipmnet.ru

^{**}E-mail: ilynykh@ipmnet.ru

тов, в дальнейшем воздушный диск может стянуться в одиночный пузырь, несколько газовых пузырьков или трансформироваться в тороидальную полость [8].

Новые группы пузырьков попадают в жидкость на различных этапах эволюции течения. Мелкие пузырьки образуются при контакте вылетающего тонкого водного диска (эжекты [9]) с поверхностью принимающей жидкости. Большие пузырьки возникают при отрыве части каверны [10], наиболее крупные – при смыкании краев венца и каверны [11]. Динамика формирования пузырьков усложняется при малых скоростях падения капли в диапазоне смены картин течения, включающем режимы слияния, зависания, отражения и выброса части капли [12]. В ходе дальнейшей эволюции течения несколько групп пузырьков наблюдаются в принимающей жидкости при погружении всплеска, стримера и вылетающих с их вершин капель [13].

Изменения структуры течения сопровождаются генерацией волн, как гравитационно-капиллярных, так и акустических [14]. Интенсивные кольцевые капиллярные волны охватывают область растекания капли [15]. Короткие волны наблюдаются на поверхности венца и каверны [16]. Тонкие струйки образуются в окрестности границы области первичного контакта сливающихся жидкостей, где происходит быстрое уничтожение свободной поверхности и трансформация доступной потенциальной поверхностной энергии (ДППЭ) в другие формы. Отдельные быстрые капельки (брызги), вылетающие с вершин струек, формируют группы коротких волны на поверхности погружающейся капли [17].

С изобретением микрофона и гидрофона в начале прошлого века начались научные исследования акустики падающих в жидкость капель, формирующих "шум дождя" [18]. Полный сигнал включает высокочастотный пакет первичного контакта капли и группу запаздывающих сравнительно низкочастотных волн [19]. Совместная регистрация картины течений и акустических сигналов позволила определить осциллирующие пузырьки как один из основных источников звука [19]. Осцилляции пузырька вызываются быстрым изменением формы при втягивании заостренного остатка разорвавшейся тонкой перемычки, связывающей отрывающийся пузырек с газовой средой [20].

Первоначально звуковые сигналы были идентифицированы как тональные, частота которых согласуется с оценками излучения осциллирующего сферического пузырька [19]. В опытах был определен диапазон параметров существования "звучащих" пузырьков и построена карта режимов на плоскости "диаметр капли — контактная скорость" [19]. Последующее применение более точной аппаратуры и программ обработки данных показало, что спектр сигнала многочастотный, доминирующая частота смещается в процессе излучения и меняется при сохраняющихся условиях опыта [21]. Временной интервал между акустическими пакетами также варьируется в широких пределах — от 0.06 до 0.18 с.

Систематические исследования показали, что диапазон параметров генерации больших газовых пузырьков достаточно широкий и не образует замкнутую область существования на карте режимов [19, 22]. Большое влияние на излучение звука оказывает форма взволнованной поверхности, всплеска и выброшенной с его вершины капли. В ряде опытов образование пузырька связывается с перекрытием узкой каверны, образующейся при погружении всплеска, следующей за ним ранее выброшенной каплей [14, 23].

Поскольку методика эксперимента при встречном освещении ("a led-based backlight" [23]) не позволяет визуализировать эволюцию тонкой структуры течения, определить механизмы взаимовлияния гидродинамических и акустических явлений, картина течения при погружении всплеска нуждается в дополнительном изучении. Для получения более полного ответа на вопрос, вынесенный в заголовок статьи "Do we understand the bubble formation by a single drop impacting upon liquid surface?" [22], впервые с высоким разрешением визуализированы каверны, следующие за растеканием свободно падающей капли и последующего всплеска (кумулятивной струи) в покоящейся жидкости.

Методической основой работы служит система фундаментальных уравнений механики жидкостей, которая здесь не приводится для краткости. Она включает уравнение переноса полной энергии, позволяющее учитывать быструю трансформацию ДППЭ в другие формы — возмущения температуры, давления и скорости тонкого течения при слиянии жидкостей, и сравнительно медленное восстановление ДППЭ при формировании новой свободной поверхности.

Среды характеризуют следующие физические параметры: плотности воздуха ρ_a и воды ρ_d (далее $\rho_{a,d}$); кинематическая $v_{a,d}$ и динамическая $\mu_{a,d}$ вязкости сред; полный σ_d^a и нормированный на плотность $\gamma = \frac{\sigma_d^a}{\rho_d} \text{ см}^3/\text{c}^2$ коэффициент поверхностного натяжения; ускорение свободного падения *g*, диаметр *D*, площадь поверхности *S*_d, объем *V*_d, масса *M*, скорость *U* в момент контакта. Набор параметров задачи включают также ДППЭ $E_{\sigma} = \sigma S_d$, сосредоточенную в шаровом слое толщиной порядка размера молекулярного кластера $\delta_{\sigma} \sim 10^{-6}$ см, и кинетическую энергию $E_k = \frac{MU^2}{2}$. В опытах капля воды диаметром D = 0.42 см свободно падала с высоты H = 53 см и контактировала с принимающей жидкостью со скоростью U = 3.1 м/с (значение определялась по видеофильмам). Поверхностная энергия капли составляла $E_{\sigma} = 4$ мкДж (ее плотность $W_{\sigma} = \frac{E_{\sigma}}{V_{\sigma}} = 2.9$ мкДж/м³), кинетическая $E_k = 200$ мкДж. Отношение компонент энергии составляет $E_R = \frac{E_k}{E_{\sigma}} = 48$, а их плотностей $W_R = \frac{E_k V_{\sigma}}{E_{\sigma} V_D} = 1.7 \times 10^{-3}$. Время передачи кинетической энергии составляет $\tau = \frac{D}{U} \sim 3$ мс, а длительность освобождения ДППЭ при первичном контакте – порядка $\tau \sim \frac{\delta_{\sigma}}{U} \sim 10$ нс.

Безразмерные условия опытов характеризуются числами Рейнольдса Re = $\frac{UD}{v}$ = 13 300, Фруда Fr = $\frac{U^2}{gD}$ = 228, Бонда Bo = $\frac{gD^2}{\gamma}$ = 2.5, Онезорге Oh = $\frac{v}{\sqrt{\gamma D}}$ = 0.0018, Вебера We = $\frac{U^2D}{\gamma}$ = 570.

Опыты выполнены на стенде ТБП, входящем в Уникальную исследовательскую установку "ГФК ИПМех РАН" [24]. Стеклянный бассейн размерами $10 \times 10 \times 7$ см заполнялся частично дегазированной водопроводной водой. Картина течения освещалась прожекторами ReyLab Xenos RH-1000 и Optronis MultiLED, а также световодами со светодиодными источниками. Поле течений регистрировалось видеокамерой Optronis CR 300 × 2 со скоростью съемки 4000 кадров/с.

Особое внимание уделено организации подсветки для визуализации тонкой структуры трехмерных течений. В основном использовались две методики. В первой, для получения контрастных изображений стенки каверны и газовых пузырьков, световоды располагались над областью всплеска, а светодиодные прожектора — сбоку. Далее полученные на темном фоне изображения инвертировались. Во второй был добавлен прожектор Rey-Lab в положении "на просвет", когда свет от источника направлен в объектив камеры сквозь бассейн с принимающей жидкостью.

Эволюцию картины течения, возникающего при растекании капли воды в воде, иллюстрирует выборка кадров из видеофильма, представленная на рис. 1. Слияние капли, которое открывается соприкосновением и уничтожением свободных поверхностей жидкостей, сопровождается передачей импульса, кинетической энергии капли, а также быстрым освобождением ДППЭ на границе пятна контакта сливающихся жидкостей [2, 14]. При этом образуется тонкая пелена, венец с изрезанной кромкой, тонкие радиальные струйки на ее выступах и мелкие капельки (брызги), вылетающие с их вершин в широком диапазоне углов к горизонту от 10° до 40°. Дно каверны на начальном этапе растекания капли плоское с небольшими неровностями (рис. 1, t = 1.25 мс).

Далее, когда форма каверны приближается к полусферической, дно каверны опускается со скоростью $U_c = 1.6$ м/с. Когда глубина каверны достигает максимума $h_c = 13.6$ мм, от кромки венца начинают сбегать капиллярные волны длиной $2 < \lambda_c < 5.6$ мм. Совместное действие поверхностного натяжения и гравитации вызывает схлопывание каверны, скорость смещения ее уплощающегося дна постепенно увеличивается до $U_c =$ = 0.68 м/с.

В данном режиме течений схлопывание каверны сопровождается образованием всплеска – струйки над поверхностью принимающей жидкости. По мере увеличения потенциальной гравитационной и ДППЭ движение вершины всплеска замедляется. При t = 133.75 мс от конической вершины всплеска отрывается капля диаметром $d_s = = 0.7$ см.

Вершина всплеска при отделении капли покрывается короткими капиллярными волнами длиной $\lambda_s < 0.6$ мм и быстро движется вниз с начальной скоростью $v_s \approx 1$ м/с. Перемещение обеспечивается согласованным действием тяготения и поверхностного натяжения, вызывающим уплощение вершины (при t = 135.5 мс радиус кривизны составляет $R_s = 0.65$ мм, при t = 137 мс $- R_s = 1.3$ мм и достигает $R_s = 2.64$ мм при t = 143 мс). Вторичная капля некоторое время сохраняет свое положение, затем начинает падать, ее нижняя кромка смещается со скоростью $U_d = 0.5$ м/с при t = 137.5 мс. Далее форма капли начинает изменяться, скорость нижней кромки увеличивается до $U_d = 0.64$ м/с при t = 144.25 мс.

Под погружающимся всплеском при t = 135 мс начинает формироваться вторая каверна полусферической формы, которая постепенно деформируется и при t = 137 мс, приобретает коническую форму. Свидетельством сильного взаимодействия течений погружающегося всплеска и принимающей жидкости служит мелкомасштабное нерегулярное смещение стенок каверны, которое начинается при t = 143 мс (увеличенное изображение приведено на рис. 2). В нижней части каверны с уплощающимся дном появляется группа капиллярных волн, бегущих к свободной поверхности (светлые полоски, рассекающие каверну на рис. 1 при t = 143 мс).

Кромка дна каверны погружается с постоянной скоростью $U_c = 0.92$ м/с до глубины $h_c = 1.83$ мм.



t = 158.5 mc

t = 164.5 mc

t = 221.75 мс

Рис. 1. Эволюция картины течения в вертикальной плоскости при растекании свободно падающей капли воды в воде (*D* = 0.42 см, *U* = 3.1 м/с), изображение инвертировано.

Первый локальный максимум глубины $h_c = 2$ мм достигается при t = 138.5 мс, при этом дно каверны сглаживается. Далее после незначительного уменьшения глубина каверны вновь подрастает и достигает h = 2 мм при t = 142.5 мс (периодограмма изменения глубины каверны приведена на рис. 3). Одновременно с осцилляциями дна правая сторона каверны по всей глубине заполняется водой, о чем свидетельствует просветление изображения около боковой стенки. Наклонная кон-

тактная граница вода—воздух в полости движется в горизонтальном направлении со скоростью $U_b = 6$ м/с, уплощающееся дно смещается вверх со скоростью $U_c = 2$ м/с, t = 143.5 мс.

После заполнения каверны в жидкости остается семейство мелких газовых пузырьков, повторяющее форму каверны до заполнения (возможно располагавшихся на стенках каверны и "вмороженных" при быстром заполнении). Сохраняющий "пузырьковый след" размывается последующими



Рис. 2. Схлопывание каверны при погружении всплеска и появление группы вмороженных мелких пузырьков (D = 0.42 см, U = 3.1 м/с).



Рис. 3. Изменения глубины и инвертированные фотографии течения (D = 0.42 см, U = 3.1 м/с); каверны: I – первичная, II – под погружающимся всплеском, III – следующая за растеканием вершины всплеска, IV – возвратившейся вторичной капли, вылетевшей с вершины всплеска; длины маркеров – 1 см.

быстрыми течениями, формирующимися вследствие передачи кинетической энергии всплеска и быстрой конверсии ДППЭ при уничтожении свободной поверхности всплеска и деформированной поверхности жидкости.

При этом вершина всплеска продолжает погружаться со скоростью $U_s = 0.85$ м/с, t = 144 мс, а в жидкости формируется новая заостренная каверна глубиной $h_c = 6.3$ мм. Сложная форма газовой полости при t = 158.5 мс, на которой присутствуют вогнутые участки, указывает на интенсивные течения в прилегающей жидкости [14]. Внезапно полость начинает снизу заполняться жидкостью, выталкивающей воздух. Дно полости

Таблица	1
---------	---

Номер каверны	1		2		3		4	
Номер опыта	Ι	II	Ι	II	Ι	II	Ι	II
Задержка, мс	0	0	135	132.25	148	144.75	171	166.75
Время жизни, мс	49.25	49.25	9	12.5	16.5	17.25	27.5	35
Макс. глубина, мм	13.6	14	2	2.9	6.3	5.7	9.6	9.1
Скорость роста, м/с	1.6	1.65	0.8	0.95	0.7	0.73	0.64	0.63
Скорость коллапса, м/с	0.68	0.54	<3.12	<5.9	0.47 11.4	0.5 5.9	0.69	0.1 0.69

уплощается, его нижняя кромка движется со скоростью $U_c = 0.5$ м/с. На боковой поверхности видны гребни и впадины капиллярных волн длиной $\lambda_c = 0.8$ мм.

Скорость движения верхней кромки падающей капли составляет $U_d = 0.4$ м/с, t = 158 мс, далее увеличивается до $U_d = 0.6$ м/с, t = 164 мс и достигает $U_d = 1$ м/с в конце процесса слияния. Увеличение ускорения смещения верхней кромки капли отражает влияние изменения поверхностной энергии при контакте капли с деформированной поверхностью принимающей жидкости. При этом меняется форма остатка капли, вершина которой заостряется и принимает коническую форму (рис. 1, t = 164.5 мс). Стенки каверны искажены быстро впадинами, гребнями и короткими капилярными волнами.

При стягивании каверны, образовавшей после полного слияния возвратившейся капли всплеска, в центре области возмущения образуется новая, более тонкая, чем всплеск, струйка — стример [21], а в жидкость выталкивается газовый пузырек (рис. 1, t = 221.75 мс).

Эволюция картины течений в нижней части заполняющейся вторичной каверны погружающегося всплеска прослежена на рис. 2. Схлопыванию предшествует формирование тонких возмущений у дна каверны при t = 141 мс. Деформация контура каверны вызвана бегущими кольцевыми капиллярными волнами, которые визуализируются светлой полоской при t = 142 мс, перемещающейся от дна к свободной поверхности (за время $\Delta t = 0.75$ мс волна сместилась на высоту $\Delta z \sim 0.3$ мм).

Заполнение газовой полости при погружении всплеска происходит и снизу, и сбоку, на что указывает просветление изображения около боковой стенки (t = 142 мс). После прохождения границы раздела в толще жидкости визуализируется семейство газовых пузырьков (темные точки на светлом фоне в правой части изображения). Скорость движения наклонной границы ("застежки молнии" по терминологии [25]) составляет $U_b = 3.4$ м/с. Через $\Delta t = 0.25$ мс начинает просветляться изображение дна каверны. На следующем кадре вся каверна оказывается полностью заполненной жидкостью. Светлая полоса в верхней темной области – гребень кольцевых волн. Через $\Delta t = 0.5$ мс дно выравнивается и вся каверна, представленная на рис. 2, t = 141 мс оказывается заполненной жидкостью, содержащей газовые пузырьки различного диаметра.

Сравнение картин течения при t = 142 и 143.75 мс показывает, что пузырьки "вморожены" в жидкость и практически неподвижны. Граница области жидкости с основной массой пузырьков (отдельные находятся за ее пределами) повторяет форму каверны при t = 141 мс.

Вторичная капля с вершины струи падает на возмущенную поверхность жидкости, в которой остаются активные течения и волны, сформировавшиеся при погружении всплеска, а также остаток каверны. Соответственно капля соприкасается не вершиной с гладкой поверхностью, как первичная, а контактирует по кольцевой линии с боковой поверхностью каверны (рис. 1, t = 164.5 мс). Перекрытие остатка каверны приводит к захвату воздуха и выталкиванию газовой полости неправильной формы, которая трансформируется в осциллирующий газовый пузырек. Форма пузырька постепенно сглаживается и становится сферической (рис. 1, t = 221.75 мс). Дальнейшее растекание капли всплеска приводит к формированию очередной каверны с еще большей максимальной глубиной (*h_c* = 9.6 мм).

На рис. 3 и рис. 4 представлены периодограммы изменения глубины и увеличенные изображения наблюдаемых каверн при двух способах визуализации — на темном фоне и с включением встречного светового потока. На врезках представлены каверны на различных этапах эволюции, причем каждая группа изображений приведена с собственным масштабом. Основные гео-



Рис. 4. Изменения глубины и прямые фотографии картины течений импакта капли (D = 0.42 см, U = 3.1 м/с), длины маркеров -1 см.

метрические и временные параметры процессов формирования и коллапса каверн приведены в табл. 1.

Геометрия и динамика первичной каверны воспроизводится достаточно точно от опыта к опыту, длительность ее существования составила $\Delta t = 49.25$ мс в обоих опытах. Далее, с задержкой $\Delta t = 133.75 \pm 1.5$ мс, связанной с движением всплеска и капли с его вершины, начинается формирование последующих каверн, сопровождающееся вбросом крупных и мелких пузырьков.

Для второй каверны, связанной с погружением всплеска, характерно наличие двух локальных максимумов глубины, обусловленных сложным характером взаимодействия погружающегося всплеска с движущейся жидкостью, в которой сохраняются тонкие течения, сопровождающие эволюцию первичной каверны.

Вторая каверна, растущая в ходе погружения всплеска, после коллапса оставляет облако мелких пузырей, воспроизводящих ее первичную форму. Третья каверна ассоциируется с прохождением верхней кромки всплеска через свободную поверхность. Она отличается заостренной формой с острыми складками, обусловленными сильными взаимодействиями погружающейся жидкости с остаточными течениями в жидкости. В эволюции обеих каверн в представленных опытах увеличение глубины и дальнейшее схлопывание происходят практически линейно.

Основная часть процесса схлопывания каверн происходит достаточно быстро, в течение 0.5...1 мс. Далее граница остатка каверны линейно движет-

ся к первоначальному положению свободной поверхности. Четвертая каверна, возникающая при слиянии ранее выброшенной капли всплеска с деформированной поверхностью жидкости, в которой сохраняется полость после частичного схлопывания третьей каверны, имеет наиболее сложную и нерегулярную форму, изрезанную капиллярными волнами, отдельными выступами и впадинами [14].

Плавное увеличение глубины каверны, когда кинетическая энергия переходит в потенциальную гравитационную и ДППЭ, существенно отличается от неравномерного темпа убывания глубины в конце процесса коллапса. Здесь наблюдается дополнительное ускорение движения дна, обусловленное быстрым освобождением ДППЭ и ее трансформацией в другие формы. На этом этапе происходит формирование быстро движущихся газовых полостей, излучающих звук.

Общая картина течений и динамика изменения размеров каверн устойчиво воспроизводятся от опыта к опыту. Коллапс второй каверны с формированием облака "вмороженных" пузырьков наблюдался во всех проведенных экспериментах в данном режиме течений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Эксперименты проведены на стендах УИУ "ГФК ИПМех РАН".

43

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00598).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Worthington A.M.* The splash of the drop. N.Y.: E. & J.B. Young & Co, 1895.
- 2. Архипов В.А., Трофимов В.Ф. Образование вторичных капель при ударном взаимодействии капли с поверхностью жидкости // ПМТФ. 2005. Т. 46. № 1. С. 55–62.
- Castillo-Orozco E., Davanlou A., Choudhury P.K., Kumar R. Droplet impact on deep liquid pools: Rayleigh jet to formation of secondary droplets // Phys. Rev. 2015. E92, 053022. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.92.053022
- Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Множественные выбросы брызг при ударе капли // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2020. Т. 494. С. 42–46. https://doi.org/10.31857/S2686740020050181
- Veron F. Ocean Spray // Ann. Rev. Fluid Mech. 2015. V. 47. P. 507–538. https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010814-014651
- Fitt B.D.L., McCartney H.A., Walkalate P. The role of rain in dispersal of pathogen inoculum // Ann. Rev. Phytopath. 1989. V. 27. P. 241–270. https://doi.org/10.1146/annurev.py.27.090189.001325
- Thoroddsen S., Etoh T., Takehara K. Air entrapment under an impacting drop // J. Fluid Mech. 2003. V. 478. P. 125–134. https://doi.org/10.1017/S0022112002003427
- Jian Z., Channa M. A., Kherbeche A., Chizari H., Thoroddsen S. T., Thoraval M.-J. To split or not to split: dynamics of an air disk formed under a drop impacting on a pool // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 124 (18), 184501. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.184501
- 9. *Liang G., Guo Y., Shen S. et al.* Crown behavior and bubble entrainment during a drop impact on a liquid film // Theor. Comput. Fluid Dyn. 2014. V. 28. P. 159–170.

https://doi.org/10.1007/s00162-013-0308-z

- 10. *Phillips S., Agarwal A., Jordan P.* The sound produced by a dripping tap is driven by resonant oscillations of an entrapped air bubble // Sci Rep. 2018. V. 8. 9515. https://doi.org/10.1038/s41598-018-27913-0
- Deka H., Ray B., Biswas G., Dalal A., Tsai P.-H., Wang A.-B. The regime of large bubble entrapment during a single drop impact on a liquid pool // Phys. Fluids. 2017. V. 29. 09210. https://doi.org/10.1063/1.4992124
- Chashechkin Yu.D., Ilynykh A.Yu. Total coalescence, rebound and fast partial bounce: three kinds of interaction of free fallen drop with a target fluid // FDMP. 2020. V. 16. № 4. P. 801–811. https://doi.org/10.32604/fdmp.2020.09168
- 13. *Pumphrey H.C., Elmore P.A.* The entrainment of bubbles by drop impacts // J. Fluid Mech. 1990. V. 220.

P. 539–567. https://doi.org/10.1017/S0022112090003378

- 14. *Чашечкин Ю.Д.* Пакеты капиллярных и акустических волн импакта капли // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2021. № 1 (94). С. 73–92. https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-1-73-92
- GuoZhen Z., ZhaoHui L., DeYong F. Experiments on ring wave packet generated by water drop // Chin. Sci. Bull. 2008. V. 53. P. 1634–1638. https://doi.org/10.1007/s11434-008-0246
- 16. Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е. Гидродинамика удара капли: короткие волны на поверхности венца // ДАН. 2013. Т. 451. № 1. С. 41–45. https://doi.org/10.1134/S1028335813070021
- 17. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Капиллярные волны на поверхности погружающейся в жидкость капли // ДАН. 2015. Т. 465. № 4. С. 548–554. https://doi.org/10.7868/S0869565215340101
- Вовк И.В., Гринченко В.Т. Звук, рожденный потоком (очерк об аэрогидродинамической акустике). Киев: Наукова думка, 2010. 221 с.
- 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. https://doi.org/10.1146/annurev.fl.25.010193.003045
- 20. Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е. Тонкая структура акустических сигналов, вызванных падением капли на водную поверхность // ДАН. 2015. Т. 463. № 5. С. 538–542. https://doi.org/10.7868/S0869565215230097
- 21. Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е. Эволюция структуры акустических сигналов, вызванных ударом падающей капли о жидкость // Акустический журнал. 2020. Т. 66. № 4. С. 377–390. https://doi.org/10.31857/S0320791920040012
- 22. *Wang A., Kuan C., Tsai P.* Do we understand the bubble formation by a single drop impacting upon liquid surface? // Phys. Fluids. 2013. V. 25, 101702. https://doi.org/10.1063/1.4822483
- 23. Gillot G., Derec C., Genevaux J.-M., Simon L. Benyahia L. "A new insight on a mechanism of airborne and underwater sound of a drop impacting a liquid surface" // Phys. Fluids. 2020. V. 32. 062004. https://doi.org/10.1063/5.0010464
- 24. УИУ "ГФК ИПМех РАН": Гидрофизический комплекс для моделирования гидродинамических процессов в окружающей среде и их воздействия на подводные технические объекты, а также распространения примесей в океане и атмосфере. Сайт: http://www.ipmnet.ru/uniqequip/gfk/#equip.
- Gillot G., Simon L., Génevaux J.-M. Benyahia L. Acoustic signatures and bubble entrainment mechanisms of a drop impacting a water surface with surfactant // Phys. Fluids. 2021. V. 33. 077114. https://doi.org/10.1063/5.0055361

EVOLUTION OF SHAPES OF THE SUBSEQUENCE CAVITIES BY THE FREE-FALLING DROP IMPACT

Yu. D. Chashechkin^a and A. Yu. Ilinykh^a

^a Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation Presented by Academician of the RAS V.F. Zhuravlev

The evolution of the shape of a sequence of cavities accompanying of a freely falling drop with a liquid at rest coalescence is traced by the method of high-speed video recording. The flow is visualized by the "dark field" method in the side view (the line of sight lies on the free surface), as well as "back light". In the first case, LED sources were installed on top and on the side of the transparent cuvette, in the second, a spotlight located behind the cuvette was added to the LED sources. For the first time, the high-resolution experimental technique enable to register oscillations of the secondary caverns bottom and visualize groups of gas bubbles, including "frozen-in" ones, which reproduce the initial shape of the rapidly filling second cavern, which is formed during the splash coalescence. The next shallow cavity is formed after the splash top is submerged. The last cavity is formed by a returning drop previously ejected from the top of the splash. An acceleration in the rate of the collapsing cavity depth is associated with the conversion of the available potential surface energy with a decrease in the area of the free surface of the fluid.

Keywords: drop, cavity, splash, waves, gas bubbles