

УДК 532.5

ВОЛНЫ И ПУЗЫРИ ИМПАКТА КАПЛИ

© 2023 г. А. Ю. Ильиных*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского Российской академии наук”,
Лаборатория механики жидкостей, Москва, Россия

*E-mail: ilynykh@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 29.08.2022 г.

После доработки 16.09.2022 г.

Принята к публикации 26.09.2022 г.

Методами скоростной видеорегистрации визуализирован широкий набор тонких быстрых течений (капиллярные волны, лигаменты, вихревые структуры), обусловленных процессами конверсии поверхностной энергии в другие формы (флуктуации давления и температуры, формирование и движение новых компонентов) при уничтожении контактных поверхностей в зоне слияния свободно падающей капли с принимающей жидкостью.

DOI: 10.31857/S0367676522700181, EDN: JTTFMV

ВВЕДЕНИЕ

Импакт капли — совокупность гидродинамических и акустических процессов, сопровождающих перенос вещества и энергии погружающейся капли в принимающую жидкость — имеет место во многих технологических, технических и природных процессах. Механизмы переноса вещества и энергии капли играют важную роль в процессах перемешивания в фармакологической, химической, нефтехимической и биохимической промышленности, в биодизельных двигателях, в системах охлаждения, пожаротушения и для профилактики возгораний [1]. Большое внимание уделяется анализу механизмов эрозии, капельного обмена минеральными и органическими веществами, биоматериалами (вирусами, микробами) между атмосферой и гидросферой [2].

Импакт капли сопровождается набором структурных компонентов как крупных (каверна, венец, всплеск, каскады вихревых колец, последовательности вторичных капель), так и мелкомасштабных (пелена мелких струек и брызг, капиллярные волны, вихревые петли, лигаменты). Набор компонентов, их геометрические и физические параметры зависят от режима импакта, который задается параметрами задачи (энергетикой капли, физическими и термодинамическими параметрами сред) [3].

В систему уравнений задачи помимо начальных и граничных условий входят уравнения переноса массы, импульса и энергии, а также потенциал Гиббса, включающий дополнительные члены для поверхностного и приповерхностного

слоев [4]. Механизмы переноса — предмет актуальных теоретических и экспериментальных исследований. Перенос вещества капли в принимающую жидкость осуществляется посредством вихрей, волн и лигаментов — нитей, связывающих волны и вихри. Генерация групп коротких капиллярных волн на всех основных структурных элементах (капля, каверны, венец, струи и, собственно, поверхность принимающей жидкости) сопровождает весь процесс погружения капли. Рассматриваются макроскопические механизмы переноса энергии течением со скоростью $\bar{u}$ и волнами с групповой скоростью c_g , а также микроскопический атомно-молекулярный перенос, как медленный диссипативно-диффузионный, так и быстрый, при уничтожении свободных поверхностей сливающихся жидкостей и конверсии доступной потенциальной поверхностной энергии (ДППЭ) в другие формы [5].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование условий образования и эволюции волн капиллярного масштаба, образующихся на разных стадиях погружения капли в глубокую жидкость.

ПАРАМЕТРЫ ЗАДАЧИ

В число размерных параметров задачи входят условия эксперимента (диаметр $D = 0.3\text{--}0.5$ см и высота $H = 1\text{--}200$ см падения капли, скорость в момент контакта $U = 0.34\text{--}5.2$ м/с), ускорение свободного падения $\bar{g}$ и физические свойства взаимодействующих сред: плотности $\rho_{d,t,a}$ кинетическая энергия

матические $v_{d,t,a}$ и динамические $\eta_{d,t,a}$ вязкости, коэффициенты поверхностного натяжения σ_d^a , σ_t^a , их отношения и нормированные на плотность капельной жидкости значения $\gamma_{d,t}^a = \frac{\sigma_{d,t}^a}{\rho_{d,t}}$, где индекс d соответствует капле, t — принимающей жидкости, a — среде, в которой происходит импакт (воздух). В работе оценивались кинетические $E_k = MU^2/2$ и поверхностные $E_\sigma = \sigma S_d$ энергии капель, их плотности и отношения.

В опытах использовались водные растворы али-зариновых чернил различной концентрации, окрашенного этанола и солей (перманганат калия, медный и железный купорос, натриевые соли).

Отношения размерных параметров задачи задают наборы безразмерных комбинаций, включающие традиционные числа: Рейнольдса, Фруда, Вебера (для данной серии опытов имели широкий диапазон значений $Re \sim 10^3 - 10^4$, $Fr \sim 1 - 10^2$, $We \sim 1 - 10^3$), Бонда и Онезорге (значения которых менялись слабо $Bo \sim 1$, $Oh \sim 10^{-3}$ ввиду близости физических параметров использованных в опытах жидкостей).

Пространственные и временные масштабы задачи также оцениваются из отношений размерных параметров и лежат в широком диапазоне — для воды наибольший и наименьший масштабы длины составили от $\delta\delta_{min}^{v-6}$ см, $\tau\tau_{min}^{v-10}$ с (диссипативно-капиллярные масштабы) до $\delta\delta_{gmax}^{\gamma}$ см (капиллярно-гравитационный), $\tau\tau_{vmax}^D$ с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эволюция картины переноса вещества капли в принимающую жидкость исследована методами фото- и высокоскоростной видеорегистрации с учетом собственных масштабов задачи в широком диапазоне параметров. Опыты выполнены на стенде для визуализации тонкоструктурных компонентов быстропротекающих процессов в жидкости (ТБП), входящем в состав Гидрофизического комплекса для моделирования гидродинамических процессов “УИУ ГФК ИПМех РАН” (входит в список Уникальных исследовательских установок).

В состав стенда входит высокоскоростная камера со скоростью съемки до 40000 кадров/с и цифровой фотоаппарат с датчиком отрыва капли и линией управляемой задержки (шаг задержки $\Delta = 1$ мкс), наборы оптических кювет с плоским и профилированным дном, наборы светодиодных и студийных осветителей, дозатор для капель, соединенный с резервуаром для капельной жидко-

сти, размещен на штативе, который позволяет изменять высоту свободного падения капли до 260 см. Оптическая система стенда позволяет разрешать структуры с линейным размером ~ 10 мкм, вести съемки под углом от 0° до 75° к горизонту как “на просвет”, так и в отраженном от экранов свете.

ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ И РЕЖИМЫ СЛИЯНИЯ

Поверхностная энергия, обусловленная анизотропией действия атомно-молекулярных сил на контактных границах, равномерно распределена в тонком шаровом слое толщиной порядка размера молекулярного кластера $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$ см.

В момент контакта за короткое время $\Delta t_s \sim 10^{-10}$ с происходит уничтожение тонкого слоя (толщиной $\delta_s \sim 10^{-8}$ см), где среда может распадаться на ионные кластеры, а затем — слияние жидкостей (уничтожение приповерхностных слоев) на масштабе δ_σ , и выброс из области слияния отдельных тонких стримеров. За время $\Delta t_\sigma = \delta_\sigma/U \sim 10^{-8}$ с в выражении для термодинамического потенциала Гиббса $dg_s = -sdT + VdP + \sigma dS_b + \mu_n dN_n$ исчезают дополнительные члены σdS_b (пропорциональный изменению площадей контактирующих поверхностей) и $\mu_n dN_n$ [6], зависящие от химического потенциала и концентрации соответствующих компонентов.

Высвобождение ДППЭ в области контакта жидкости приводит к формированию новых компонентов течений, что сопровождается генерацией групп коротких волн капиллярного масштаба в широком временном диапазоне процесса. Для глубокой жидкости дисперсионное соотношение для случая коротких длин волн (порядка нескольких сантиметров и менее) записывается в виде

$$\omega = \pm \sqrt{k^3 \frac{\sigma}{\rho}}, \quad (1)$$

откуда фазовая скорость капиллярных волн ($c^2 = \frac{\omega^2}{k^2}$) находится по формуле

$$c = \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{(\rho\lambda)}}, \quad (2)$$

где λ — длина волны.

Отношение кинетической и потенциальной энергии определяет режим течения: интрузивный для $E_k < E_\sigma$ и режим всплеска при $E_k > E_\sigma$ [7], где в случае смешивающихся жидкостей отмечен дискретный характер распределения вещества капли по поверхности каверны — лигаменты формируют полосы и сетку. Число ярусов сетки и концен-

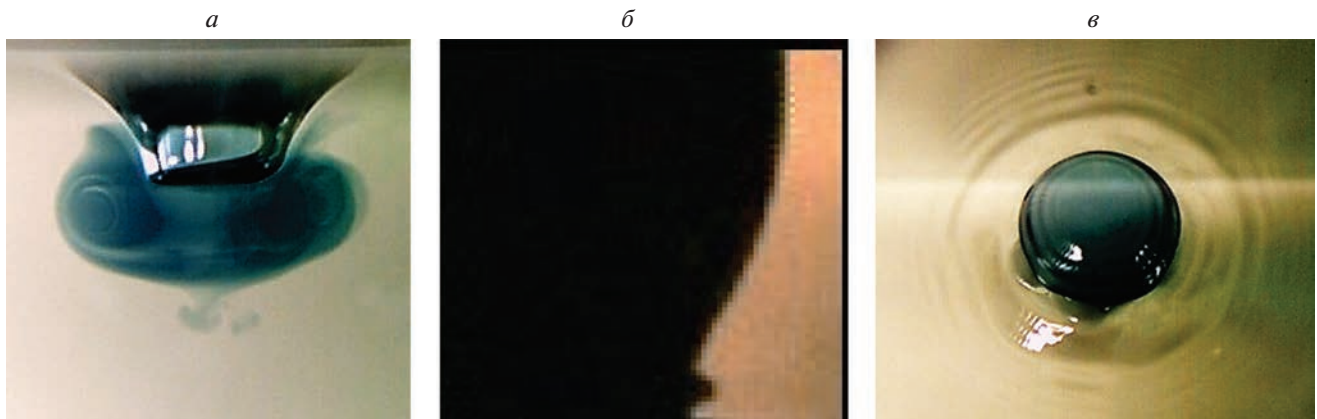


Рис. 1. Погружение капли водного раствора чернил (концентрация 1 : 200, $\rho = 1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, $\sigma = 73 \text{ г} \cdot \text{с}^{-2}$, $\nu = 0.01 \text{ г} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) в режиме интрузии: а) задержка формирования каверны, б) пелена в области слияния капли с принимающей жидкостью (вид сбоку), в) капиллярные волны на поверхности капли и принимающей жидкости (вид сверху). Скорость капли $U = 0.34 \text{ м/с}$, $E_\sigma = 4 \text{ мкДж}$, $E_k = 2.24 \text{ мкДж}$, $Re = 1450$, $Fr = 2.8$, $We = 6.7$, $Bo = 2.5$, $Oh = 0.0018$.

трация вещества капли в структуре зависят кинетической энергии капли [8].

ИНТРУЗИВНЫЙ РЕЖИМ

В проведенных экспериментах режим интрузии наблюдался при погружении капель, свободно падающих с высот $H = 1\text{--}5 \text{ см}$, достигая при этом скорости в момент контакта $U = 0.34\text{--}1 \text{ м/с}$. Для интрузивного режима характерно формирование в принимающей жидкости сплошного объема каплевой жидкости в форме погружающегося с постоянной скоростью вихря, формирование каверны начинается с задержкой 10–15 мс (рис. 1а) [7]. Энергии дисковой пелены, сформированной в области слияния жидкостей при контакте, недостаточно для развития эжекты и венца, диск быстро втягивается в интрузию (рис. 1б). Поскольку интрузивный режим наблюдается при малых скоростях погружения капли, короткие кольцевые капиллярные волны, сформированные у контактной линии слияния жидкостей, наблюдаются как на поверхности принимающей жидкости (их длина плавно увеличивается по мере погружения капли и достигает $\lambda_c = 12 \text{ мм}$), так и на поверхности погружающейся капли от области контакта к ее вершине длиной $\lambda_c = 1\text{--}6 \text{ мм}$ (рис. 1в). Над поверхностью жидкости растекающаяся капля образует коническую область с перемычкой, отделяющей остаток капли от формируемой интрузии (отскок капли). Далее процесс может многократно повторяться с длительными задержками вторичной капли на поверхности принимающей жидкости [9].

РЕЖИМ ВСПЛЕСКА

Для режима всплеска характерно значительно большее количество групп капиллярных волн на разных фазах процесса. В данной серии опытов режим задавался установкой высоты свободного падения капли от 10 до 200 см (скорость в момент контакта $U = 1.4\text{--}5.2 \text{ м/с}$). Сверхкороткие капиллярные волны наблюдаются уже у линии контакта погружающейся капли (на дне формирующейся каверны) на временах порядка 0.2–0.5 мс от соприкосновения. На начальном этапе слияния жидкостей при уничтожении поверхностных слоев происходит трансформация выделенной ДППЭ в сверхбыструю эжекту (скорость вылета брызг из области слияния в 4–5 раз превосходит скорость капли), ориентированную радиально по периметру зоны слияния, и эшелоны брызг, отделяющиеся от эжекты в радиальном направлении. Множественность брызг указывает на множественность и дискретность их источников (рис. 2а).

Тонкие брызги, формирующие пелену и, далее, шеврон венца, ориентированы в широком диапазоне углов, что предопределяет удар части из них по поверхности погружающейся капли (рис. 2б). Попадание мелких брызг на поверхность погружающейся капли определяется относительной разностью коэффициентов поверхностного натяжения жидкостей $R_\sigma = \frac{(\sigma_t \sigma_d)}{(\sigma_t + \sigma_d)}$ и может приводить к генерации групп капиллярных волн, периодически расположенных по линии контакта жидкостей при $R_\sigma \leq 0$. Длины волн в таких группах, как правило, порядка $\lambda_c \sim 0.1 \text{ мм}$.

В процессе эволюции импакта капли увеличивается как угол вылета брызг и капель (от $5^\circ\text{--}6^\circ$

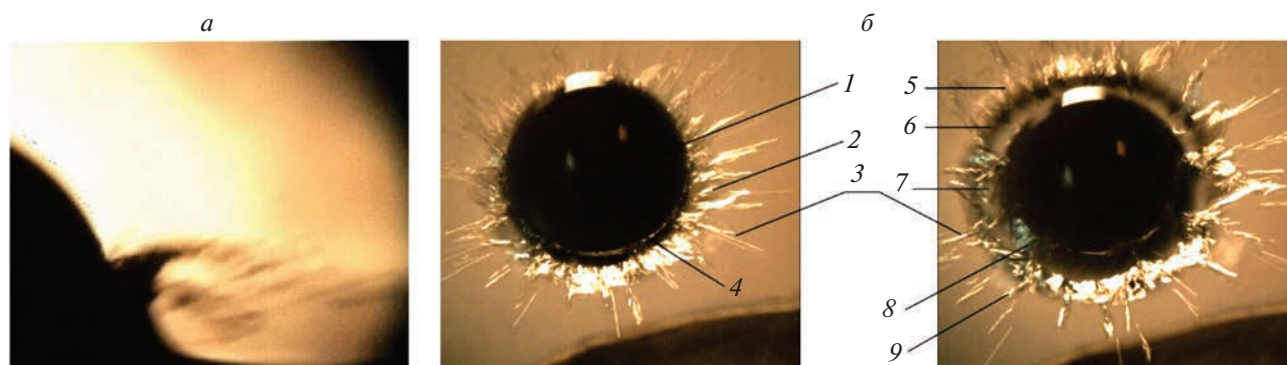


Рис. 2. Слияние капли водного раствора ализариновых чернил в режиме всплеска: распад контактной поверхности на множественные брызги (*а*), формирование структуры тонких течений (*б*) при погружении капли раствора ализариновых чернил в воду: 1 – капля, 2 – изрезанная кромка пелены, 3 – брызги, 4 – линия контакта сливающихся жидкостей с капиллярными волнами, 5 – тонкая пелена, 6, 7 – поверхности венца и каверн, 8 – группы капиллярных волн на поверхности капли, 9 – шипы венца. $U = 3.5$ м/с, $E_G = 4$ мкДж, $E_k = 238$ мкДж, $Re = 15000$, $Fr = 290$, $We = 730$, $Bo = 2.5$, $Oh = 0.0018$.

при первичном контакте до 90° на этапе схлопывания каверны), так и их линейный размер (капли до 1 мм) [10]. Структура распада контактной границы включает обилие компонентов течений (рис. 2), геометрия которых рассматривалась в [11].

По мере развития тонких приповерхностных течений вещество капли распределяется дискретным образом, собирается в тонких линейчатых и сетчатых элементах – волокнах (рис. 3*а* и 3*б*). В верхнем ряду венца волокна шириной порядка гравитационно-капиллярного масштаба образуют периодическую вертикальную линейчатую структуру. Группы волокон сливаются на кромке венца и продолжатся в виде шипов, с вершин которых выбрасываются мелкие вторичные капли. На поверхности каверны выражена сетчатая структура, включающая трех-, четырех- и пятиугольные ячейки с диффузной областью на дне и перфорацией на дне и в узлах сетки.

Линейчатые структуры устойчиво воспроизводятся, наблюдаются во всех фазах процесса слияния капли: на растущей каверне и венце, а также на заполняющейся каверне и погружающемся венце, сохраняются до распада кумулятивной струи [12]. Положение и пространственная ориентация волокон со временем меняются.

В узлах сетчатой картины распределения вещества капли по поверхности каверны ярусно формируются вихри, развивающиеся внутри принимающей жидкости (перфорация стенок каверны). Трансформация приповерхностных вихрей в петли происходит на этапе схлопывания каверны, который сопровождается генерацией на поверхности каверны волн, длина и амплитуда которых растет со временем (рис. 3*в*). Наибольшие

угловые и линейные трансформации вихрей происходят на гребнях волн [13].

Одновременно с заполнением каверны происходит спадание венца. При этом с его вершины по поверхности сбегает капиллярные волны, длина которых растет со временем и лежит в диапазоне $\lambda_c = 2\text{--}5$ мм. По мере заполнения каверны жидкостями и разрушения венца капиллярные волны сбегает по их поверхностям к центру, где формируется центральная (кумулятивная) струя – всплеск. Поверхность каверны при этом искажена крупными капиллярными волнами $\lambda_c = 6\text{--}10$ мм большой амплитуды, наличие которых выражается в дискретном характере роста длин и углов пространственного положения вихревых петель, образующихся из вихрей в узлах сетчатых структур. Система кольцевых капиллярных волн движется радиально и от области контакта жидкостей, рассмотрена подробно в [14]. Их длина в данных опытах плавно возрастала от $\lambda_c \approx 0.5\text{--}1$ мм и достигала 12 мм.

Боковая поверхность струи между каустиками покрыта короткими кольцевыми капиллярными волнами длиной $\lambda_c \sim 0.1$ мм. Капиллярные волны наблюдаются позднее на вершине струи при отрыве вторичных капель (длиной $\lambda_c \sim 0.5$ мм) и на заостренном основании струи при ее отрыве от деформированной принимающей жидкости ($\lambda_c = 0.1\text{--}0.15$ мм, рис. 3*г*). За отрывом струи следует частичное сжатие струи и формирование вторичной каверны в принимающей жидкости, в которую погружается струя. Для второй каверны характерно наличие двух локальных максимумов глубины, обусловленных сложным характером взаимодействия погружающегося всплеска с де-

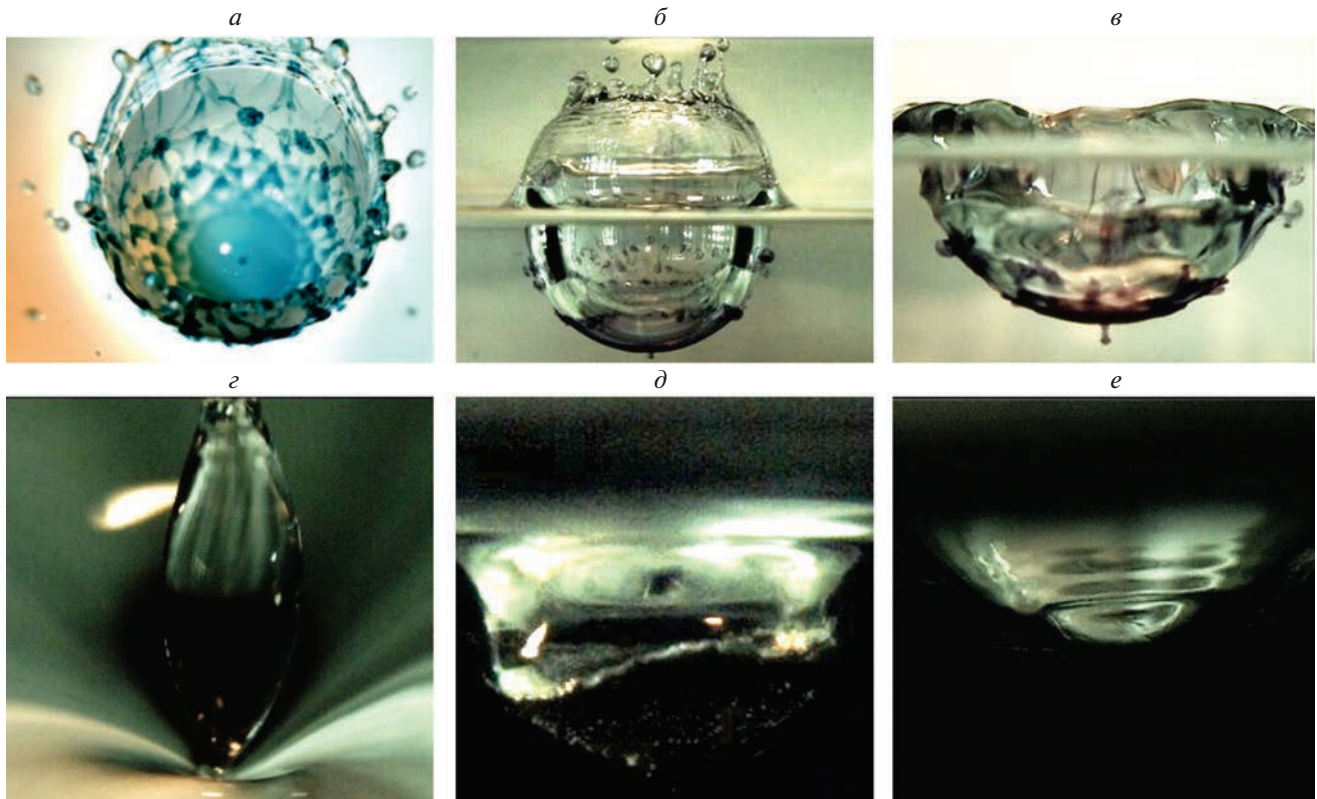


Рис. 3. Режим всплеска при погружении капли водного раствора чернил в воду: дискретные структуры импакта при $U = 3.5$ м/с (а) и при $U = 5.2$ м/с (б); $E_\sigma = 4.2$ мкДж, $E_k = 562$ мкДж, $Re = 22300$, $Fr = 640$, $We = 1600$, $Bo = 2.5$, $Oh = 0.0018$; крупные капиллярные волны на поверхности каверны (в), погружающегося всплеска (г) и заполняющейся вторичной каверны (д); облако мелких пузырей, формируемое при быстром схлопывании вторичной каверны (е): $U = 3.5$ м/с.

формированной поверхностью принимающей жидкости, в которой сохраняются тонкие течения, сопровождающие эволюцию первичной каверны.

Погружение струи и мгновенное заполнение ею полости каверны обуславливают формирование в принимающей жидкости газовых полостей и пузырей широкого диапазона размеров. При этом облако пузырей воспроизводит первичную форму каверны (рис. 3д). На поверхности остатка заполняющейся каверны наблюдаются короткие капиллярные волны длиной $\lambda_c = 0.1\text{--}0.2$ мм (рис. 3е). Подробно динамика захлопывания второй и последующих каверн описана в [15].

Формирование третьей каверны связано с прохождением верхней кромки всплеска через свободную поверхность. Она отличается заостренной формой с острыми складками, обусловленными сильными взаимодействиями погружающейся жидкости с остаточными течениями в принимающей жидкости. Схлопывание третьей каверны и, в частных случаях, второй каверны сопровождается отделением крупных пузырей эволюционирующей формы. Осциллирующие пузыри непра-

вильной формы являются источниками пакетов акустических сигналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты большого числа опытов показали наличие устойчиво воспроизводимого, обширного набора тонких течений, образующихся в зоне слияния свободно падающей капли с поверхностью принимающей жидкости, среди которых выделяются быстрые струи, переносящие вещество капли волокна (лигаменты), капиллярные волны, зубцы, шипы, брызги, периодически возмущенную структуру поверхности венца и резкие границы ячеек. Генерация быстрых компонентов импакта капли обусловлена процессами конверсии доступной потенциальной поверхностной энергии в другие формы (флуктуации давления и температуры, движение новых компонентов с образованием новых поверхностей) в зоне слияния при уничтожении контактных поверхностей. Дальнейшая эволюция тонких течений включает формирование венца и каверны с дискретным распределением вещества, выброс брызг, а также генерацию коротких капиллярных волн на вновь образованных компонентах течений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00598). Эксперименты выполнены на стенде ТБП Гидрофизического комплекса для моделирования гидродинамических процессов (УИУ “ГФК ИПМех РАН”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lan M., Wang X., Zhu P., Chen P.* // Energy Procedia. 2015. V. 66. P. 173.
2. *Bhagat R.K., Wykes M.S.D., Dalziel S.B., Linden P.F.* // J. Fluid Mech. 2020. V. 903. Art. No. F1.
3. *Ray B., Biswas G., Sharma A.* // Commun. Comput. Phys. 2012. V. 11. No. 4. P. 1386.
4. *Chashechkin Yu.D.* // Mathematics. 2021. V. 9. No. 6. P. 586.
5. *Чашечкин Ю.Д.* // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Ест. науки. 2021. No. 1(94). С. 73.
6. *Teschke O., de Souza E.F.* // Phys. Chem. 2005. V. 7. No. 22. P. 3856.
7. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* // ДАН. Физ. тех. науки. 2021. Т. 496. № 1. С. 45; *Chashechkin Y.D., Ilinykh A.Y.* // Dokl. Phys. 2021. V. 66. No. 1. P. 20.
8. *Ильиных А.Ю.* // ПММ. 2019. Т. 83. № 3. С. 413; *Ilinykh A.Y.* // Fluid Dynam. 2019. V. 54. No. 7. P. 927.
9. *Chashechkin Y.D., Ilinykh A.Y.* // FDMP. 2020. V. 16. No. 4. P. 801.
10. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* // ДАН. Физ. тех. науки. 2020. Т. 494. С. 42; *Chashechkin Y.D., Ilinykh A.Y.* // Dokl. Phys. 2020. V. 65. No. 10. P. 366.
11. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* // ДАН. Физ. тех. науки. 2021. Т. 497. С. 31; *Chashechkin Y.D., Ilinykh A.Y.* // Dokl. Phys. 2021. V. 66. No. 4. P. 101.
12. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* // ДАН. Физ. тех. науки. 2018. Т. 481. № 2. С. 145; *Chashechkin Y.D., Ilinykh A.Y.* // Dokl. Phys. 2018. V. 63. No. 7. P. 282.
13. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* // ДАН. Физ. тех. науки. 2021. Т. 499. № 1. С. 48; *Chashechkin Y.D., Ilinykh A.Y.* // Dokl. Phys. 2021. V. 66. No. 8. P. 234.
14. *Zhu G.Z., Li Z.H., Fu D.Y.* // Chin. Sci. Bull. 2008. V. 53. P. 1634.
15. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* // ДАН. Физ. тех. науки. 2022. Т. 502. С. 36; *Chashechkin Y.D., Ilinykh A.Y.* // Dokl. Phys. 2022. V. 67. No. 1. P. 15.

Waves and bubbles of drop impact

A. Yu. Ilinykh*

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119526 Russia

**e-mail: ilinykh@ipmnet.ru*

High-speed video recording methods have been used to visualize a wide range of thin fast flows (capillary waves, ligaments, vortex structures) caused by the processes of surface energy conversion into other forms (pressure and temperature fluctuations, formation, and movement of new components) during the destruction of contact surfaces in confluence of a freely falling drop with a target fluid.