



Перенос вещества составной капли в интрузивном и импактном режимах¹

Ильиных А.Ю., Хайирбеков Ш.Х.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

Исследование переноса вещества импакта капли в глубокой жидкости продолжается более полутора сотен лет, начиная с работ [1, 2] где был рассмотрен процесс формирования многоярусной системы вихревых колец, и остается актуальным ввиду теоретической обоснованности и ряда прикладных задач: методы обеспечения противопожарной безопасности [3], химической, нефтехимической и биологической промышленности. Повышение пространственного и временного разрешения экспериментальной техники, применение коротких импульсов видимого и рентгеновского диапазона, применение химически активных веществ позволяют проследить наиболее тонкие и быстрые компоненты картин течения импакта капли [4].

В большинстве экспериментальных, численных и теоретических работ рассматривается импакт однородных капель (невязких [5], вязких [6], суспензий для различных значений чисел подобия). Для регистрации процесса переноса вещества капли в экспериментальных исследованиях капельная жидкость трассируется пигментами [5, 6] или

мелкими частичками. В реальных технологических процессах [7] капли могут быть образованы несмешивающимися жидкостями: составными (ядро и оболочка) или составленными, когда все компоненты имеют границу жидкость–газ.

В формировании структуры течений важная роль принадлежит процессам передачи, трансформации и диссипации энергии. В задачах импакта однородных капель в зависимости от энергетических параметров задачи выделяются три режима переноса вещества капли в принимающей жидкости [8]. При малых контактных скоростях, когда кинетическая энергия капли меньше доступной потенциальной поверхностной энергии (ДППЭ) $E_\sigma > E_k$, плавно втекающая капля образует компактную интрузию чечевицеобразной формы в толще жидкости и окрашенное кольцо на свободной поверхности. Формирования каверны у поверхности принимающей жидкости начинается с задержкой в 10–12 мс. В ходе дальнейшей эволюции течения интрузия трансформируется в погружающееся вихревое кольцо, порождающее каскад вторичных вихрей.

При больших контактных скоростях, когда кинетическая энергия капли много больше ДППЭ $E_k > E_\sigma$, каверна начинает формироваться с момента первичного контакта. В области контакта сред формируются тонкий опережающий каверну

¹Работа выполнена по теме Государственного задания (№ государственной регистрации 123021700044-0).

переходный слой, толщина которого стремительно уменьшается по мере развития каверны, и быстрые струйки, растекающиеся в тонком слое в окрестности следа уничтожаемой контактной поверхности, на дне каверны и стенках венца. Волокнистые следы струек образуют характерные линейчатые и сетчатые структуры на поверхности жидкости. Непрерывно перестраивающаяся волокнистая картина распределения вещества длительное время сохраняется в толще принимающей жидкости.

В данной работе экспериментально прослежены картины распределения вещества составных капель (состоящих из двух несмешивающихся жидкостей: ядро и оболочка) по деформированной поверхности принимающей жидкости в импактном и интрузивном режимах.

Размерные параметры задачи включают физические параметры четырех взаимодействующих сред (вместо трех в классической постановке задачи), которые характеризуются термодинамическими и кинетическими параметрами, а также условиями опытов. К физическим параметрам задачи относятся: плотности (воздуха ρ_a , внутренне и внешней капле ρ_{ed} , ρ_{id} и принимающей жидкости ρ_t), четыре кинематических v_d^n , v_d^s , v_a , v_t и динамических вязкостей μ_d^n , μ_d^s , μ_a , μ_t ; шесть полных $\sigma_{d,n}^s$, $\sigma_{d,n}^a$, $\sigma_{d,s}^a$, σ_t^a , $\sigma_t^{d,n}$, $\sigma_t^{d,s}$ коэффициентов поверхностного натяжения для поверхностей раздела сред, коэффициенты диффузии вещества $\kappa_t^{d,n}$, $\kappa_t^{d,s}$ в принимающей жидкости, условия опытов (эквивалентные диаметры D_n и D_s и скорость капли U в момент первичного контакта или высота свободного падения H).

В экспериментах методом коаксиальных трубок создавались капли ализариновых чернил диаметром $D \sim 0.5$ см, покрытые выраженной масляной пленкой подсолнечного масла, которые затем свободно падали с высоты $H = 1 \div 60$ см в глубокую чистую воду.

При взаимодействии смешивающихся жидкостей вещество капли распределяется дискретным

образом по возмущенной поверхности принимающей жидкости, собирается в тонких линейчатых элементах — лигаментах [5, 9]: вертикальных линейчатых структурах в верхнем ряду короны и сетчатой структуре на поверхности каверны. Картина распределения вещества составных капель иная. В короткое время порядка $\Delta t_s \sim 10^{-10}$ с при контакте принимающей жидкости и внешней капли уничтожается поверхностный слой толщиной в несколько молекулярных кластеров $\delta_s \sim 10^{-8}$ см. За более длительное время $\Delta t_\sigma = \delta_\sigma / U \sim 10^{-8}$ с происходит уничтожение приповерхностных слоев и взаимодействие жидкостей в пятне контакта. ДППЭ трансформируется в другие формы, в частности в энергию новых компонентов течений.

В режиме интрузии составных ядерных капель короткий промежуток времени (до 4 мс) сохраняется оболочка, капля погружается как твердое тело с незначительными деформациями (Рис. 1, а). После разрыва оболочки (Рис. 1, б) вещество ядра начинает просачиваться в воду в форме интрузии с короткими кольцевыми возмущениями на ее поверхности (Рис. 1, в) и трансформируется в компактный погружающийся объем (Рис. 1, г).

При слиянии ядерных составных капель с водой в режиме интрузии движение ядерного вещества происходит по возмущенной поверхности каверны и венца, покрытых веществом оболочки (подсолнечного масла), распределенной тонким слоем по деформированной поверхности принимающей жидкости. Картина распределения ядерного вещества капли не гладкая, состоит из ряда секторов, образованных линиями, располагающимися от дна каверны к вершине шеврона венца, внутри секторов периодически расположены горизонтальные периодические полосы с шагом 0.5 мм (Рис. 2, а).

Изменение освещенного вдоль одного из секторов картина распределения вещества ядерной капли при слиянии с водой в режиме импакта представлено на Рис. 2, б.

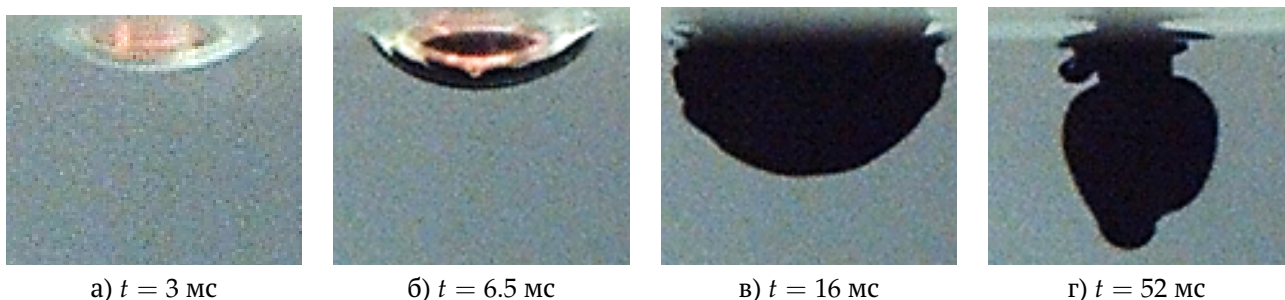


Рис. 1. Основные этапы эволюции картины течения при импакте составной капли с чернильным ядром и масляной оболочкой

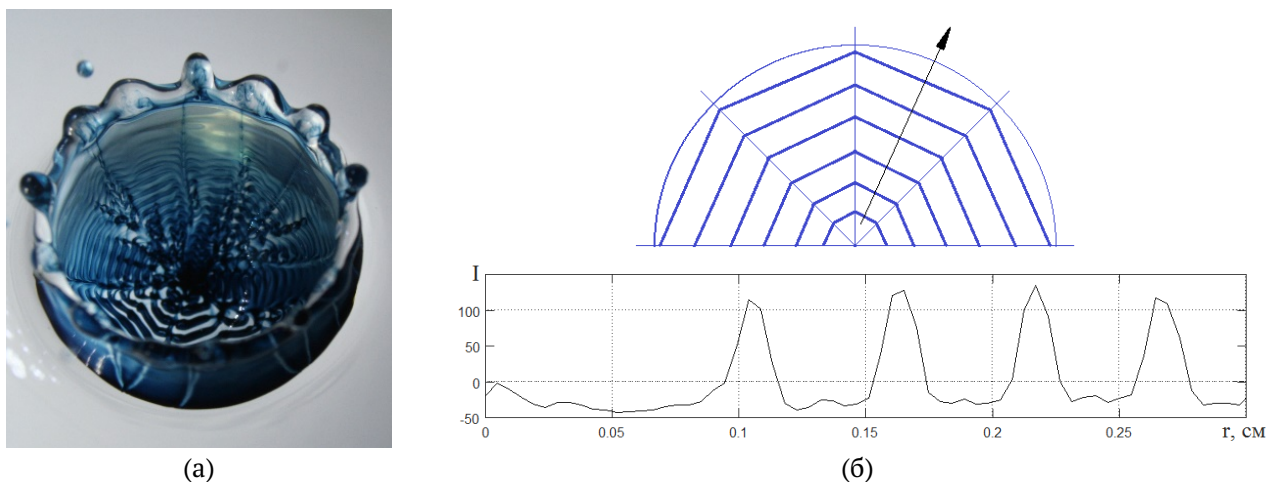


Рис. 2. Картина распределения вещества составной капли (капля чернил в масляной оболочке): а) результаты эксперимента, б) модель (верхний рисунок) и оценка масштабов структур

Заключение

Детали картины распределения вещества составной капли существенно отличаются от распределения капли однородной: сетчатая структура сменяется секторальной с тонкими горизонтальными периодическими структурами — лигаментами. Периодические окрашенные структуры указывают на возмущенность поверхности, по которой распределяется вещество внутренней капли.

Список литературы

- [1] *Rogers W.B.* On the formation of rotating rings by air and liquids under certain conditions of discharge // *Am. J. of Sci. and Arts.* 1858. 2nd Ser. V. 5. Art. 33. P. 246–258.
- [2] *Thomson J.J., Newall H.F.* On the formation of vortex rings by drops falling into liquids, and some allied phenomena // *Proc. R. Soc. London.* 1885. V. 29. P. 417–436.
- [3] *Lan M., Wang X., Zhu P., Chen P.* Experimental Study on the Dynamic Process of a Water Drop with Additives Impact upon Hot Liquid Fuel Surfaces // *Energy Procedia.* 2015. V. 66. P. 173–176.
- [4] *Lee J.S., Park S.J., Lee J.H., Weon B.M., Fezzaa K., Je H.J.* Origin and dynamics of vortex rings in drop splashing // *Nat. Commun.* 2015. V. 6. 8187.
- [5] *Ильиных А.Ю., Чашечкин Ю.Д.* Гидродинамика погружающейся капли: линейчатые структуры на поверхности венца // *Известия РАН. Механика жидкости и газа.* 2017. № 2. С. 152–164.
- [6] *Ильиных А.Ю., Чашечкин Ю.Д.* Гидродинамика погружающейся капли: несмешивающиеся жидкости // *Известия РАН. Механика жидкости и газа.* 2020. № 2. С. 19–27.
- [7] *Hsieh W.-D., Lin S.-Y., Chen R.-H., Lin T.-H.* Burning behavior of gas-in-oil compound drops // *Combust. Sci. Technol.* 2010. V. 183. pp. 51.
- [8] *Chashechkin Yu.D., Ilinykh A. Y.* Intrusive and impact modes of a falling drop coalescence with a target fluid at rest // *Axioms.* 2023. V. 12, Iss.4, 374.
- [9] *Chashechkin Yu.D.* Conventional partial and new complete solutions of the fundamental equations of fluid mechanics in the problem of periodic internal waves with accompanying ligaments generation // *Mathematics.* 2021. V. 9. No. 586.