



Эволюция тонкой структуры картины распределения вещества составной оболочечной капли в принимающей жидкости на начальном этапе процесса слияния¹

Ильиных А.Ю., Хайирбеков Ш.Х.

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

Интерес к импакту капли обусловлен глубоким научным содержанием явления, а также широким спектром приложений в промышленности. Нынешний уровень развития вычислительной техники пока еще не позволяет провести прямое численное моделирование капельных течений на основе систем фундаментальных уравнений механики жидкостей [1]. В связи с этим исследование импакта капли в значительной степени полагается на эксперимент. В опытах расширяется диапазон частот зондирующего излучения, включающий и радио-, и световые и рентгеновские волны, улучшается временное и пространственное разрешение регистрирующей аппаратуры, совершенствуются программы обработки информации.

Список технологий, использующих составные капли в химической, фармацевтической, пищевой, металлургической и других массовых отраслях про-

мышленности быстро расширяется. Составные капли, образующиеся при попадании капель воды в расплавленный металл, нагретый выше температуры Лейденфроста, служат дополнительным источником возникновения пожаров при промышленных авариях [2]. Одним из перспективных направлений считается создание новых видов топлив, в которых составные капли содержат воду, добавки, воздух или горючие газы [3]. Осцилляции составных капель активно изучаются аналитическими методами.

В зависимости от соотношения $R_{En_{\sigma}}^{En_k}$ кинетической энергии капли $En_{k,d}$ в момент контакта капли с принимающей жидкостью и доступной потенциальной поверхностной энергии (ДППЭ) $En_{\sigma,d}$ картины переноса вещества капли качественно разделяются на две группы. В интрузивном режиме слияния [4], когда кинетическая энергия капли меньше поверхностной, $R_{En_{\sigma}}^{En_k} = En_{k,d}/En_{\sigma,d} < 1$, капля плавно втекает в толщу жидкости, а каверна образуется с задержкой в несколько миллисекунд. В импактном режиме, при $R_{En_{\sigma}}^{En_k} \gg 1$, капля растекается по поверхности каверны и венца тонкими струйками (триклами, лигаментами), следы которых образуют

¹Эксперименты проведены на стенде ТБП УИУ «ГФК ИПМех РАН» при финансовой поддержке РФФ (проект 19-19-00598-П).

линейчатые и сетчатые структуры, состоящие из треугольных и многоугольных ячеек [5]. На начальном этапе слияния тонкие струйки, содержащие вещество капли, пронизывают дно каверны и поступают в толщу принимающей жидкости в виде отдельных волокон, образующих моховидный слой под дном каверны.

В зависимости от пространственной структуры многожидкостные капли традиционно именуется *составными* (*compound*), в которых капли одной жидкости заключены в другой жидкости и *составленные* (*composed*). В составных каплях все контактные поверхности непрерывные и замкнутые. В составленных каплях на контактных поверхностях существуют замкнутые линии и отдельные точки контакта трех сред. В двухкомпонентных составных каплях (компаунд, ядерных или оболочечных) с внешней средой контактирует только одно вещество, в составленных (дуальных, парных или янус-каплях в зарубежной литературе) — оба.

В отличие от классической постановки задачи слияния однородной капли, размерные параметры, участвующие в описании слияния составной капли, включают физические параметры уже не трех, а четырех контактирующих сред — принимающей жидкости, воздуха, внутреннего ядра и внешней оболочки капли. Принадлежность параметра обозначается индексами для принимающей жидкости t , воздуха a , ядра d^n и оболочки d^s , капли, соответственно. В число основных размерных параметров входят плотности $\rho_d^n, \rho_d^s, \rho_a, \rho_t$, четыре кинематических $\nu_d^n, \nu_d^s, \nu_a, \nu_t$ и динамических вязкостей $\mu_d^n, \mu_d^s, \mu_a, \mu_t$; шесть полных $\sigma_{d,n}^s, \sigma_{d,n}^a, \sigma_{d,s}^a, \sigma_t^a, \sigma_t^{d,n}, \sigma_t^{d,s}$ и шесть соответствующих коэффициентов поверхностного натяжения, нормированных на плотность $\gamma_{d,n}^s, \gamma_{d,n}^a$,

$\gamma_{d,s}^a, \gamma_t^a, \gamma_t^{d,n}, \gamma_t^{d,s}$ для поверхностей раздела сред; эквивалентные диаметры D_n и D_s , площади поверхности S_d^n и S_d^s , объемы V_d^n и V_d^s ; массы M_d^n и M_d^s ядра и оболочки; ДППЭ $En_{\sigma,d}^{n,s} = \sigma_{d,s}^{n,s} S_d^n$ и $En_{\sigma,d}^{s,d} = \sigma_{d,s}^{s,a} S_d^s$; коэффициенты диффузии вещества ядра и оболочки капли в принимающей жидкости $\kappa_t^{d,n}, \kappa_t^{d,s}$, а также контактная скорость капли U , которая движется как целое, ее полная масса $M_d = M_d^n + M_d^s$, кинетическая энергия капли $En_{k,d} = M_d U^2 / 2$ и ее компонентов — ядра $En_k^n = M_d^n U^2 / 2$ и оболочки $En_k^s = M_d^s U^2 / 2$.

Отношения характерных масштабов одинаковой размерности задают набор традиционных безразмерных параметров процесса, включающий числа Рейнольдса $Re = UD/\nu$, Фруда $Fr = U^2/gD$, Бонда $Bo = gD^2/\gamma_{d,s}^a$, Онезорге $Oh = \nu/\sqrt{\gamma D}$ и Вебера $We = DU^2/\gamma_{d,s}^a$, которые применяются для сравнения условий проведенных опытов.

В проведенных опытах ядро капли состояло из разбавленных ализариновых чернил, оболочка — подсолнечное масло. Положение ядра в каплях строго не регулировалось и менялось от опыта к опыту. Полученные составные капли имели наружный диаметр $D = 5.0$ мм, толщина масляного слоя лежала в диапазоне $0.2 < \Delta l_s < 1.1$ мм.

В отличие от растекания смешивающихся жидкостей в импактном режиме здесь (Рис. 1, а) в первые $\Delta t = 2$ мс после контакта не наблюдается интенсивного образования лигаментов.

По поверхности жидкости растекается масляный слой. После отрыва капельки происходит капиллярное сжатие остатка шипа и начинается стягивание масляной пленки. При этом слой окрашенной жидкости преобразуется в последовательность

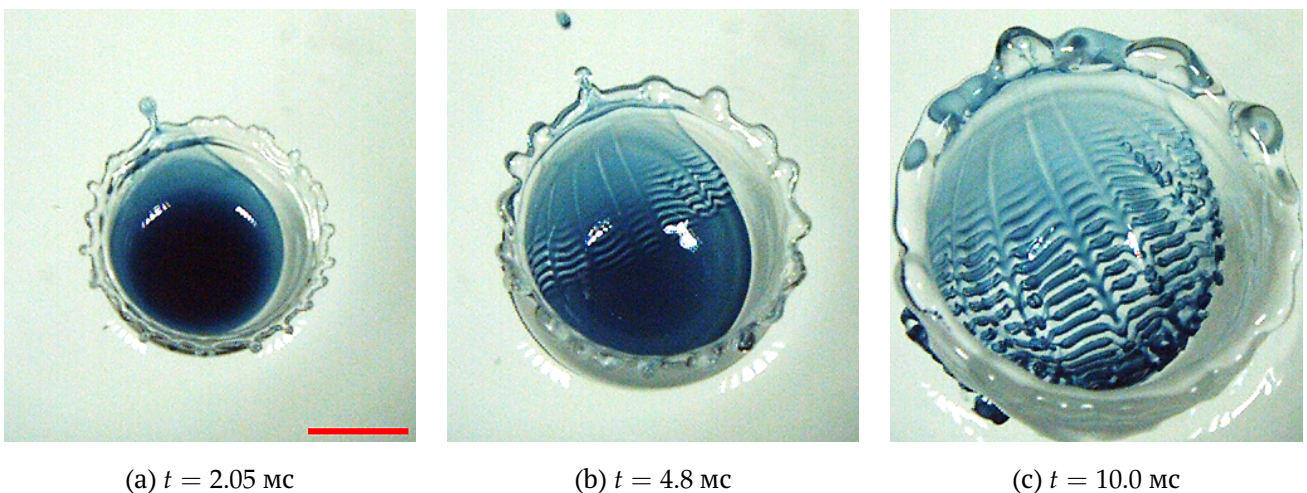


Рис. 1. Падение составной капли в воду. $H = 44$ см. Маркер — 5 мм

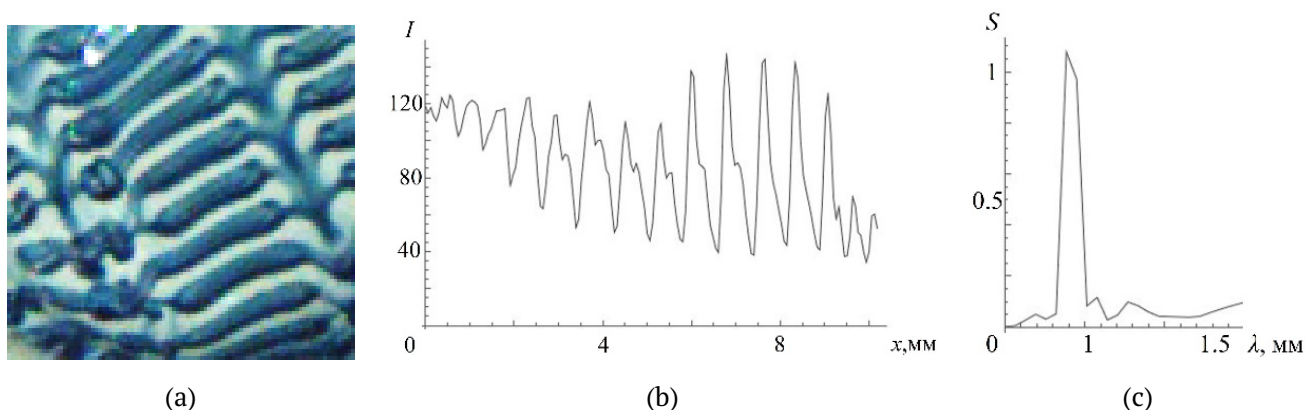


Рис. 2. а) Увеличенный вид решетки на Рис. 1, с чернильными валиками; б) распределение относительной освещенности I поперек валиков; с) его спектр S

тонких поперечных волокон (Рис. 1, б). По мере изменения геометрии каверны происходит быстрая трансформация картины течения. Вначале становятся все более выраженными продольные полосы, в их окрестности появляются кольцевые структуры, на периферии образуются двойные петли (Рис. 1, с). Отдельные элементы картины течения Рис. 1, с приведены на Рис. 3, а в увеличенном формате. Наличие вторичных пиков на Рис. 2, б говорит о присутствии волокон и связанных с ними менее и более плотно окрашенных областей на более малых масштабах (внутри валиков), что согласуется с прямыми наблюдениями на увеличенном изображении.

Общая структура картины течения сохраняется при уменьшении контактной скорости капли. Иллюстрирующие выборки из видеофильма приведены на Рис. 3 (в данном опыте капля падала

с высоты $H = 30$ см). Сравнение картин течений, приведенных на Рис. 1 показывает, что полосчатые структуры в следе сливающейся составной кадры в импактном режиме образуются в обоих опытах. Сохраняются характерные размеры и время развития структуры $\sim 8-15$ мс.

Дальнейшие опыты показали, что симметрия течения существенно зависит от положения ядра относительно внешнего контура падающей капли (Рис. 4).

Просветление изображения выделяет сложную и регулярную внутреннюю структуру распределения пигментированной жидкости, в которой выражены яркие петли, оконтуривающие области более слабо окрашенной жидкости (Рис. 4, с). Тонкие волокна просматриваются внутри светлых пятен во всей окрашенной области течения.

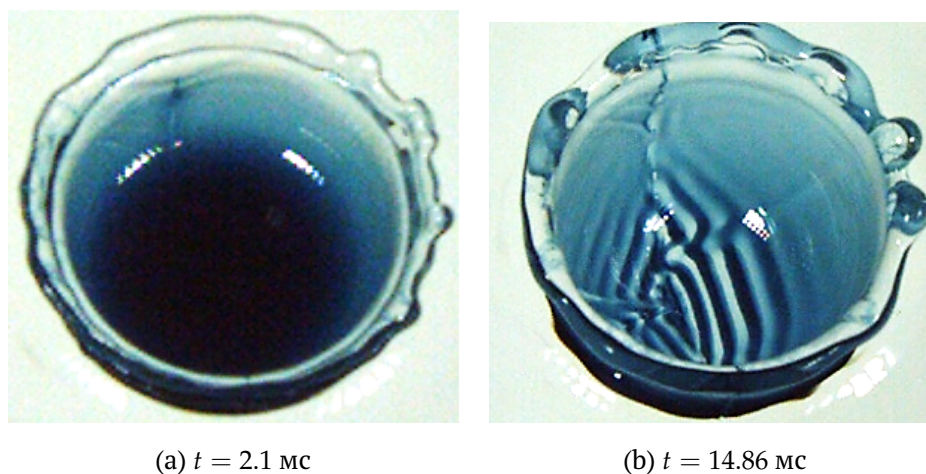


Рис. 3. Распределение вещества составной чернильно-масляной капли в воде

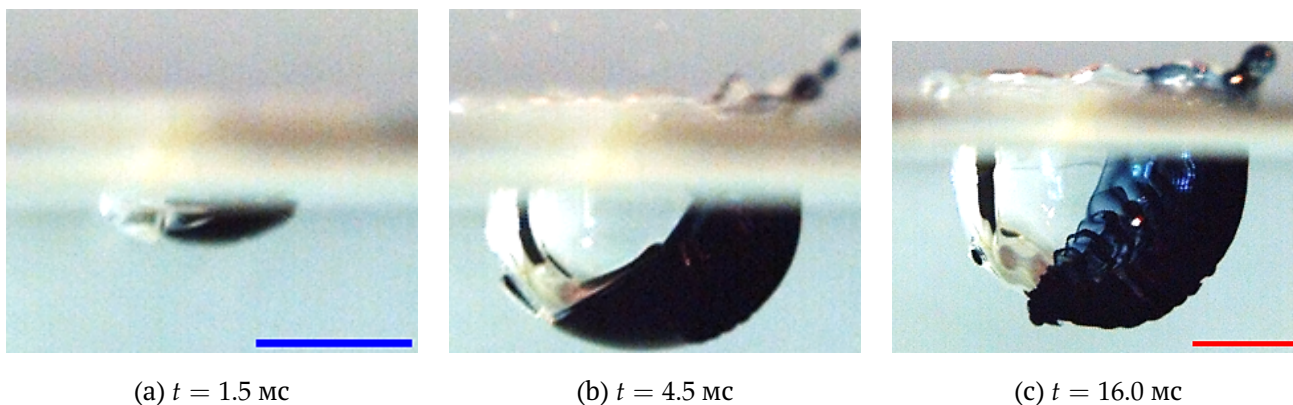


Рис. 4. Распределение вещества составной капли в воде. Маркеры – 5 мм

Список литературы

- [1] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука. 1986. 736 с.
- [2] Чашечкин Ю.Д. и др. Группы брызг импакта капли воды, свободно падающей в расплавленный металл // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2021. Т. 498. С. 22–26.
- [3] 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. p. 51.
- [4] Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Задержка формирования каверны в интрузивном режиме слияния свободно падающей капли с принимающей жидкостью // Доклады РАН. 2021. Т. 496.
- [5] 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(4). p. 374. <https://doi.org/10.3390/axioms12040374>