



## Тонкие структуры картины быстрого переноса вещества капли, свободно падающей в глубокую жидкость, в интрузивном и импактном режимах<sup>1</sup>

Ильиных А.Ю.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

Методами высокоскоростной видеорегистрации экспериментально прослежена эволюция тонкой картины переноса вещества при импакте свободно падающей капли в покоящейся принимающей жидкости в интрузивном, импактном и переходном режимах, которые задаются энергетическими параметрами задачи. Проанализированы картины течения в боковой и фронтальной проекциях. Основное внимание в работе уделено тонкоструктурным механизмам переноса вещества капли. Рассматриваются макроскопические механизмы переноса энергии течением со скоростью  $u$  и волнами с групповой скоростью  $c_g$ , а также микроскопический атомно-молекулярный перенос (медленный диссипативно-диффузионный, и быстрый, обусловленный уничтожением свободных поверхностей контактирующих жидкостей и конверсии доступной потенциальной поверхностной энергии

(ДППЭ) в другие формы [1]). Быстрые процессы преобразования ДППЭ в другие формы на кольцевой границе области слияния жидкостей способствуют формированию тонких струек и генерации капиллярных волн в принимающей жидкости [2].

В число размерных параметров задачи входят условия эксперимента (диаметр  $D = 0.42 \div 0.45$  см и скорость в момент контакта  $U = 0.34 \div 4.3$  м/с (высота свободного падения  $h = 1 \div 200$  см), ускорение свободного падения  $g$  и физические свойства взаимодействующих сред: плотности  $\rho_{d,t,e}$  кинематические  $\nu_{d,t,e}$  и динамические  $\eta_{d,t,e}$  вязкости, коэффициенты поверхностного натяжения  $\sigma_d^a, \sigma_t^a$  и их отношения, где индекс  $d$  соответствует капле,  $t$  — принимающей жидкости,  $e$  — среде, в которой происходит взаимодействие (воздух). В работе оценивались кинетические  $E_k = MU^2/2$  и поверхностные  $E_\sigma = \sigma S_d$  энергии капель. Температуры жидкостей и среды считаются равными. Набор безразмерных параметров задачи включает числа Рейнольдса  $1450 < Re < 18000$ , Фруда  $2.8 < Fr < 450$ , Бонда  $Bo = 2.39$ , Онезорге  $Oh = 0.0018$ , Вебера  $6.7 < We < 1100$ .

<sup>1</sup>Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00598-П «Гидродинамика и энергетика капли и капельных струй: формирование, движение, распад, взаимодействие с контактной поверхностью», <https://rscf.ru/project/19-19-00598/>).

ния переноса массы, импульса и энергии, а также потенциал Гиббса с дополнительными членами для поверхностного и приповерхностного слоев [3]. Поверхностная энергия равномерно распределена в тонком слое толщиной порядка размера молекулярного кластера  $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$  см. При слиянии контактирующих жидкостей за время  $\Delta t_\sigma = \delta_\sigma / U \sim 10^{-8}$  с происходит аннигиляция приповерхностных слоев с трансформацией высвобожденной энергии (малой по значению, но большой по плотности) в другие формы — в выражении для потенциала Гиббса  $dg_s = -sdT + VdP + \sigma dS_b + \mu_n dN_n$  исчезает дополнительный член  $\sigma dS_b$ , зависящий от коэффициента поверхностного натяжения, дифференциала площади контактируемой поверхности.

Опыты выполнены на стенде ТБП, входящем в состав комплекса «УНУ ГФК ИПМех РАН». Капли чистой воды и водных растворов перманганата калия, медного купороса, железного купороса, ализариновых чернил, поваренной соли или пищевой соды падали в стеклянный бассейн, заполненный частично дегазированной водопроводной водой. На основе анализа большого числа проведенных опытов в широком диапазоне значений высот (скоростей в момент контакта, кинетических энергий) свободно падающих капель картины переноса вещества разделяются на режимы, которые определяются отношением кинетической и потенциальной энергии: интрузивный для  $E_k < E_\sigma$ , режим всплеска при  $E_k > E_\sigma$  и переходный  $E_k \approx E_\sigma$ .

Для интрузивного режима, который наблюдается при малых контактных скоростях и, характерно плавное втекание вещества капли с образованием кольцевой тонкоструктурированной области с масштабами петлистых структур  $\Delta l_\varphi = 0.5$  и  $0.3$  мм у поверхности принимающей жидкости (Рис. 1, а), а в толще жидкости — компактного объема (интрузии), опережающего формирование газовой поло-

сти (каверны) на время 10–12 мс (Рис. 1, б, в) [4]. Первичный контакт происходит без образования брызг и выраженной пелены. Группы кольцевых капиллярных волн наблюдаются как на поверхности остатка погружающейся капли  $\lambda_d = 0.3 \div 0.5$  мм, так и на поверхности принимающей жидкости  $\lambda_d = 0.5 \div 0.8$  мм (от области слияния к вершине капли и радиально). Каверна конической и полусферической формы продвигается в толщу жидкости и отесняет интрузию от свободной поверхности. Интрузия трансформируется в сферический вихрь с примыкающими петлистыми структурами, радиально сосредоточенными в кольцевой структурированной области на поверхности принимающей жидкости.

Для импактного режима слияния характерны большие скорости капель, каверна начинает формироваться практически с момента первичного контакта, вслед за тонкой переходной областью мелкомасштабных возмущений, включающих вещество капли, которое также распределяется по поверхности жидкости в виде вихрей, отдельных волокон, образующих линейчатые и сетчатые картины на поверхности каверны и венца и, далее, вытянутых петлистых структур. Волокнистый характер распределения пигмента сохраняется в ходе последующей эволюции течения [5]. Степень выраженности отдельных структурных компонентов течений зависит от параметров задачи, в частности — контактной скорости капли, коэффициента диффузии, относительной разности физических величин (вязкость, плотность, коэффициент поверхностного натяжения).

В области перехода от режима интрузии к импактному при сохранении выраженной опережающей интрузии сокращается время задержки начала формирования каверны. В форме дна интрузии выражены шероховатости размахом до  $\Delta r_i \sim 0.1$  мм.

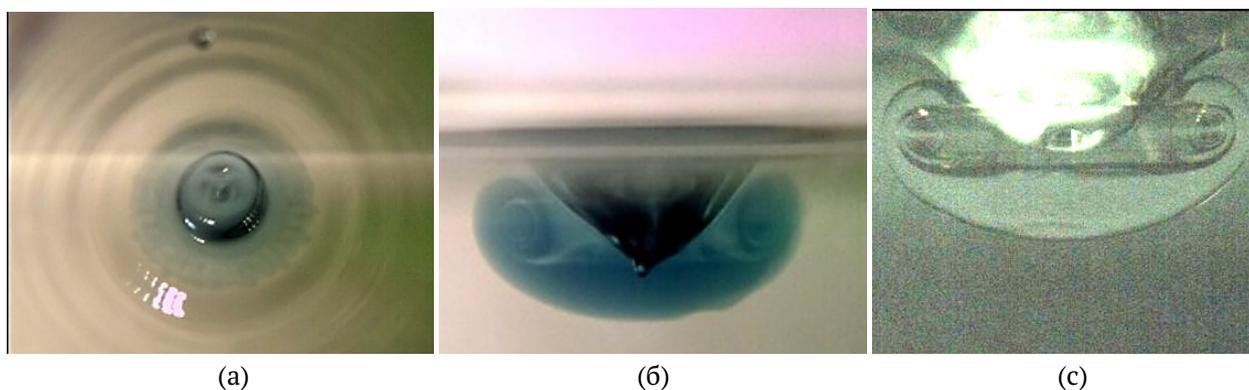


Рис. 1. Картина течений в режиме интрузии ( $U = 0.34$  м/с,  $E_\sigma = 4$  мкДж,  $E_k = 2.24$  мкДж): а) радиальные петли (вид сверху), б, в) трансформация интрузии в вихревое кольцо при импакте капли чернил и раствора соды

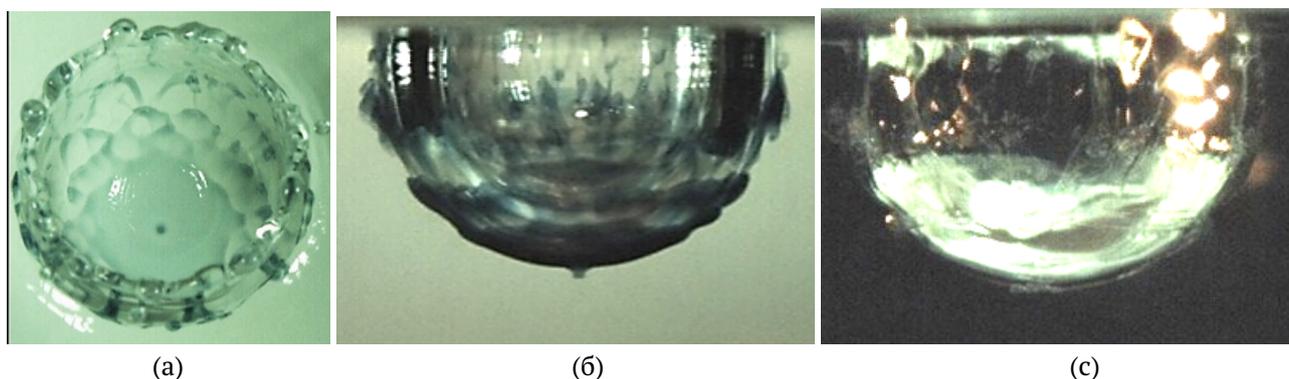


Рис. 2. Картина течений в режиме импакта ( $U = 3.1$  м/с,  $E_k = 200$  мкДж,  $E_\sigma = 4.2$  мкДж): а) сетчатая картина распределения вещества (вид сверху), б, в) тонкий переходный слой на границе каверны

Начальная скорость формирования каверны и ее максимальные размеры увеличиваются с увеличением контактной скорости капли, при этом скорость интрузии практически не меняется, что приводит к опережению фронта каверны и трансформации интрузии в тонкий переходный слой, покрывающий поверхность каверны. Заострение дна каверны покрывает собственная окрашенная оболочка толщиной  $\sim 1.5$  мм. Положение нижней кромки интрузии изменяется монотонно со временем: при большой высоте падения на всем интервале наблюдений, а при малых высотах — до момента начала интенсивного схлопывания каверны, прилегающий к поверхности интрузии.

### Заключение

В капельных течениях проявляется действие нескольких механизмов передачи энергии с собственными временными и пространственными масштабами, как макроскопических — с течениями и гравитационно-капиллярными, так и микроскопических — диффузионных и быстрой конверсии ДППЭ в другие формы. Наиболее заметно

действие конверсии ДППЭ при слиянии существующих и формировании новых свободных поверхностей. Различие картин течений в интрузивном и импактном режимах связано с особенностями действия механизмов переноса импульса и энергии в окрестности подвижной границы пятна контакта [5].

### Список литературы

- [1] Чашечкин Ю.Д. Пакеты капиллярных и акустических волн импакта капли // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2021. Т. 1. № 94. С. 73–92.
- [2] Чашечкин Ю. Д., Ильиных А. Ю. Формирование системы наклонных петель в течениях импакта капли // Доклады РАН. 2021. Т. 499. № 1. С. 48–57.
- [3] 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.
- [4] Чашечкин Ю. Д., Ильиных А. Ю. Задержка формирования каверны в интрузивном режиме слияния свободно падающей капли с принимающей жидкостью // ДАН. 2021. Т. 496. № 1. С. 45–50.
- [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, Iss.4, 374.