УДК 532.6

# ГИДРОДИНАМИКА ПОГРУЖАЮЩЕЙСЯ КАПЛИ: НЕСМЕШИВАЮЩИЕСЯ ЖИДКОСТИ

© 2020 г. А. Ю. Ильиных<sup>а,\*</sup>, Ю. Д. Чашечкин<sup>а,\*\*</sup>

<sup>а</sup> Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия \*E-mail: ilynykh@ipmnet.ru \*\*E-mail: chakin@ipmnet.ru Поступила в редакцию 29.04.2019 г.

После доработки 30.09.2019 г. Принята к публикации 08.10.2019 г.

Картины переноса вещества капель водного раствора чернил диаметром 0.2 и 0.5 см, свободно падающих в подсолнечное масло, исследовались методами макрофотосъемки и высокоскоростной видеосъемки в диапазоне высот падения от 25 до 65 см. В фазе погружения капли на форму картины течения влияет двойной слой на соприкасающихся контактных поверхностях, в котором часть доступной потенциальной поверхностной энергии жидкостей преобразуется в другие формы. Геометрии шеврона, состоящего из масла, и картины распределения вещества капли на внутренней поверхности венца оказываются подобными в начальной фазе течения. В дальнейшем формы каверны и всплеска и картины распределения вещества капли, зависящие от времени и высоты (скорости) падения капли, существенно отличаются. С началом спадания на внутренней поверхности венца образуются области, свободные от чернил (войды), оконтуренные тонкими волокнами (лигаментами) вещества капли. Волокна в последующем распадаются на мелкие капли. Прослежена геометрия всплеска, в том числе достигающего максимальной высоты в данном диапазоне параметров.

*Ключевые слова:* капля, всплеск, лигаменты, войды, перенос вещества, двойной слой **DOI:** 10.31857/S056852812002005X

Зависимость картины течений в принимающей жидкости от незначительных вариаций состава упавшей капли, замеченная еще в первых исследованиях процесса формирования вихрей в бассейне [1], в дальнейшем подтверждена данными изучения общей геометрии течений и закономерностей переноса вещества. В последовательности быстро сменяющихся структурных компонентов течений при контакте смешивающихся жидкостей выделены первичная пелена (эжекта) с неровным внешним краем, зубцы которого переходят в тонкие струйки (спайки), с вершин которых срываются мелкие капельки [2], каверна, в которую вливается остаток капли [3], выступающий венец с изрезанным внешним краем. С вершин зубцов шеврона выбрасываются тонкие струйки – стримеры, продолжающиеся последовательностями капелек, более крупных, чем с вершин первичных спайков [4]. Вниз, в каверну, по стенкам венца сбегает собственная система капиллярных волн [5]. Расширяющийся венец генерирует группу кольцевых капиллярных волн [2].

Постепенно каверна трансформируется в пологую впадину с неровным дном и восходящий центральный всплеск (кумулятивную струю) [6], за которым, при определенных условиях, следует повторный более тонкий всплеск (центральный стример), с вершины которого срывается новая последовательность мелких капелек [7]. Первичный контакт капли с принимающей жид-костью и падение вторичных капель сопровождаются образованием газовых пузырьков и излучением групп акустических пакетов [7]. При контакте смешивающихся сред окрашенное вещество капли распределяется неравномерно и оказывается сосредоточенным в тонких волокнах как на поверхности, так и в толще принимающей жидкости. Волокна образуют полосчатые структуры на стенках венца и сетчатые на дне каверны [8].

Картины течений, индуцированных падающими каплями в несмешивающихся жидкостях, изучение которых представляет и общенаучный, и практический интерес, исследованы с меньшей степенью подробности. Динамика растекания разнородных жидкостей определяет экологические последствия утечек различных масел, нефти и нефтепродуктов в природных условиях,

эффективность многих химических и биохимических технологических процессов. Особый интерес представляет изучение картин течений, вызванных падением капель нефти в воду (одного из основных источников загрязнения окружающей среды) и капель воды в нефть.

На практике большое внимание уделяется изучению взаимодействия падающих капель воды с горячими маслами и продуктами переработки нефти как в интересах оптимизации технологии тушения пожаров водой [9], так и разработки профилактических мер, препятствующих созданию опасных условий быстрого возгорания, способствующих образованию масляного тумана каплями воды, быстро испаряющимися ("взрывающимися") в горячем более легком масле. Эксперименты проводились как с реальными пищевыми и техническими маслами, так и с модельными жидкостями с малыми значениями коэффициента поверхностного натяжения [10].

Детальные исследования влияния нефтяной пленки на картины капельных течений, перенос нефти в толщу воды и вынос в воздух мелких капелек, образующих масляный туман, проведены как с отдельными каплями, так и их группами, моделирующими дождь [11], падающий на поверхность мало- и сильновязких сред. Однако процесс переноса воды в масле, особенно в начальной фазе роста венца и всплеска (кумулятивной струи), который все еще остается недостаточно изученным, представляет и физический, и биофизический интерес — особые формы бактерий, развивающиеся на контактных поверхностях капель воды в толще нефтепродукта, влияют на качество сырья в нефтехранилищах [12]. В природных условиях развитие бактерий способствует самоочищению водоемов и восстановлению экологического баланса.

Цель данной работы состоит в экспериментальном изучении тонкой структуры картины течений, возникающей при контакте и последующем погружении свободно падающей капли воды, подкрашенной чернилами, в подсолнечное масло.

## ПАРАМЕТРЫ ЗАДАЧИ

В гидродинамике капли воды, несмешивающейся с принимающей жидкостью (маслом), набор размерных параметров включает величины, характеризующие физические свойства трех контактирующих сред – воздуха (*a*), капли (*d*) и принимающей жидкости (*t*): плотности –  $\rho_a$ ,  $\rho_d$ ,  $\rho_t$ , кинематические  $v_{a,d,t}$  и динамические  $\mu_{a,d,t}$  вязкости, температуры (здесь равные для всех сред  $T_d = T_t = T_a = 20^{\circ}$ С), а также условия опытов (диаметр *D*, высота свободного падения *H*, глубина слоя жидкости  $h_t$ .). Контактные поверхности характеризуются коэффициентами поверхностного натяжения на границах капли и воздуха,  $\sigma_d^a$  [ $\sigma$ ] =  $r/c^2$ , масла и воздуха  $\sigma_t^a$ , масла и воды  $\sigma_t^d$ , а также нормированными на плотность сред значениями  $\gamma_d^a = \sigma_d^a / \rho_d$ ,  $\gamma_t^a = \sigma_t^a / \rho_t$ ,  $\gamma_t^d = \sigma_t^d / \rho_t$  см<sup>3</sup>/с<sup>2</sup>. Важную роль играет величина предельного угла на линии контакта трех сред, малому значению которого соответствует стягивание слоя воды на поверхности масла в тонкую полоску, которая постепенно разрывается на отдельные капли.

В данных опытах капля диаметром *D* свободно падала с высоты *H* в однородном поле силы тяжести с ускорением *g* (скорость в момент первичного контакта *U*) в слой жидкости глубиной  $h_i$ . К дополнительным параметрам задачи относятся масса капли *M*, площадь свободной поверхности  $S_d$ , момент **p**, кинетическая  $E_k^d = MU^2/2$  энергия и доступная потенциальная поверхностная энергия  $E_d^a = \sigma_d^a S_d$  капли, а также  $E_t^a$ ,  $E_t^d$  на контактных границах различных сред.

Определяющие уравнения и граничные условия содержат наборы собственных пространственно-временных масштабов, образующие отдельные подгруппы.

Одна группа линейных масштабов включает капиллярно-гравитационный параметр  $\delta_g^{\gamma} = \sqrt{\gamma/g}$ , входящий в дисперсионное уравнение коротких поверхностных волн [13], и диссипативно-капиллярный масштаб  $\delta_{\gamma}^{\nu} = \nu^2/\gamma$ . Другая группа линейных масштабов, зависящих от скорости капли, включает большой кинематический  $\delta_g^U = U_d^2/g$ , тонкие капиллярный  $\delta_U^{\gamma} = \gamma/U_d^2$  и прандтлев  $\delta_U^{\nu} = \nu/U_d$  масштабы.

По аналогии, одна подгруппа собственных временны́х масштабов включает только параметры среды –  $\tau_g^{\gamma} = \sqrt[4]{\gamma/g^3}$ ,  $\tau_{\gamma}^{\nu} = \nu^3/\gamma^2$ , другая – размер капли –  $\tau_{\gamma}^d = \sqrt{D^3/\gamma}$ ,  $\tau_{\kappa}^{\gamma} = \kappa D/\gamma$ ,  $\tau_{\nu}^{\gamma} = \nu D/\gamma$ ,  $\tau_{\nu}^D = D^2/\nu$ , третья – скорость капли  $\tau_U^d = D/U_d$ ,  $\tau_g^U = U_d/g$ . Для воды наибольший и наименьший

масштабы длины составляют  $\delta_{max} = \delta_g^{\gamma} = 0.27$  см и  $\delta_{min} = \delta_{\gamma}^{\nu} = 1.4 \times 10^{-6}$  см соответственно, а временные масштабы –  $\tau_{max} = \tau_{\nu}^{D} = 25$  с и  $\tau_{min} = \tau_{\gamma}^{\nu} = 1.9 \times 10^{-10}$  с. Отношения масштабов задают набор безразмерных комбинаций, включающий традиционные

Отношения масштабов задают набор безразмерных комбинаций, включающий традиционные числа: Рейнольдса Re = UD/v, Фруда Fr<sub>d</sub> =  $U^2/gD$ , Вебера We<sub>d</sub> =  $U^2D/\gamma_d$ , Бонда Bo =  $gD^2/\gamma_d^a$ , Онезорге Oh =  $v/\sqrt{\gamma D}$ . В данных опытах капли диаметром D = 0.5 и 0.2 см свободно падали с высоты H = 25, 40, 50, 60, 65 см, достигая в момент контакта скорости 2.19, 2.80, 3.13. 3.43 5.57 м/с соответственно. Большие значения чисел Рейнольдса и Фруда (Re > 7000, Fr > 200), малые чисел Oнезорге (Oh ~  $10^{-3}$ ) и переменные числа Бонда (0.5 < Bo < 3.3) указывают на сильную зависимость динамики течения от размеров, а следовательно, от отношения кинетический  $E_k$  и доступной потенциальной поверхностной энергии капли  $E_d^a$ .

Характерные масштабы определяют размер поля наблюдения, который должен быть достаточно большим, чтобы включать крупные компоненты течения (в частности, поле кольцевых волн), а также пространственное и временное разрешение инструментов, необходимое для регистрации тонких короткоживущих структур.

Опыты выполнены на стендах ЭСП и ТБП, входящих в комплекс уникальных установок УСУ "ГФК ИПМех РАН" [19]. В опытах использовался набор прямоугольных прозрачных бассейнов размером  $10 \times 10 \times 7$  см, в которые помещалась принимающая жидкость [14].

Область наблюдения освещалась светодиодными источниками Optronis MultiLED со световым потоком 7700 лм. Видеорегистрация осуществлялась с помощью Optronis CR3000x2, (частота 3000 кадров/с, выдержка 1/8000 с), фоторегистрация – фотоаппаратом Canon EOS350D с объективами Canon EFS 18–55 мм или EF 50 мм (выдержка 1/4000 с). Угол визирования на ориентир составлял от 0° до 75° к горизонту. Дополнительные макрокольца, тонкая настройка освещения с помощью экранов позволили получить пространственное разрешение около 10 мкм. Для масштабирования изображения перед каждым опытом проводилось фотографирование специальной сетки.

Блок управления включал компьютер и интерфейс, запускающий регистраторы с регулируемой задержкой с шагом 1 мкс после получения сигнала о пересечении каплей оптического луча фоторегистратора. Время запуска регистратора определялось высотой падения капли (скоростью) и длительностью промежуточных фаз эволюции картины течения при регистрации ее отдельных элементов.

Капли диаметром D = 0.2 и 0.5 см водных растворов ализариновых чернил, разбавленных в пропорции 20 : 1 и 50 : 1, свободно падали с высоты H = 25-65 см в подсолнечное масло глубиной  $h_t = 2$  см (режим формирования всплеска — кумулятивной струйки). Плотности водного раствора чернил (концентрация 1:50) и масла равны соответственно  $p_{d,t} = 0.998$  и 0.87 г/см<sup>3</sup>, вязкости —  $\mu_{d,t} = 0.01$  и 0.55 г/см · с, коэффициенты поверхностного натяжении на границе с воздухом  $\sigma_{d,t}^a = 73$  и 35 г/с<sup>2</sup>, а на границе воды и масла  $\sigma_t^d = 3.1$  г/с<sup>2</sup>.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Последовательность фотографий, иллюстрирующих структуры эволюционирующего течения при погружении капли воды в подсолнечное масло, приведена на рис. 1. В начальной фазе течения окрашенная жидкость распределена неравномерно по поверхности венца – у его кромки наблюдаются тонкие радиально ориентированные окрашенные волокна, разделенные более широкими полосками с пониженной концентрацией красителя. Тонковолокнистые полосчатые структуры и остроконечные выступы на кромке венца – свидетельства длительного существования быстрых тонких струк в картине растекания капли.

По мере погружения капли ширина каверны монотонно увеличивается, на рис. 1, а она достигает 16.5 мм, стенки венца утолщаются. Внутри зубцов сохраняются следы быстрых струек окрашенной жидкости. Постепенно на внутренней стороне венца появляются свободные от воды участки поверхности масла — войды, разделенные тонкими чернильными волокнами толщиной от 0.02 до 0.5 мм (на рис. 1, а регистрируются 14 областей протяженностью до 5 мм).

Сплошной внешний волокнистый контур охватывает область растекания окрашенной жидкости (на рис. 1, б его диаметр равен 21.7 мм). В данной фазе кривизна центра дна каверны ме-

#### ИЛЬИНЫХ, ЧАШЕЧКИН



**Рис. 1.** Картины распределения капли чернил в слое подсолнечного масла: a-e-t = 20, 40, 150 мс; диаметр каверны D = 16.5 и 21.7 мм (а, б); толщина венца – 1.2 мм (в). Каждая фотография – новый опыт, общая структура течения повторяется. Отклонение линии визирования от вертикали –  $15^{\circ}$ .



**Рис. 2.** Эволюция формы каверны, образованной каплей чернил в слое масла при H = 65 см, D = 0.5 см: a - e - t = 18, 36 и 55 мс.

няет знак — дно впадины деформирует растущий выпуклый оголовок всплеска — центральной (кумулятивной) струи. Он окружен восемью ячейками, отделенными тонкими полосками чернил, которые стягиваются в волокна и начинают распадаться на отдельные капли различных размеров. В левом верхнем углу в очерченном прямоугольнике на рис. 1, б диаметры капелек мостика составляют: 0.33, 0.09, 0.37, 0.08, 0.26, 0.13, 0.32 мм. Разделение волокна на капли идет по тому же сценарию, что и при отрыве капли от маточной жидкости под действием силы тяжести [14] участок волокна истончается, образуется тонкая перемычка, один конец которой продолжает утончаться и отрывается от капли.

В фазе роста на вершине кумулятивной струи формируется капля, которая в данных опытах отрывается, поднимается на несколько сантиметров и возвращается обратно (рис. 1, в). При этом вся окрашенная жидкость оказывается сосредоточенной в центральной части течения, и только небольшая ее часть остается на капельных дорожках — остатках границ между ячейками. Минимальные диаметры капелек составляют 0.02 мм, максимальные — 0.8 мм.

Эволюцию картины течения под поверхностью воды иллюстрирует серия фотографий, приведенная на рис. 2. На первой из них виден венец диаметром 1.9 см и высотой 0.7 см, глубина и диаметр каверны составляют 0.93 и 1.84 см. Большая часть чернил стекает по поверхности каверны, оставляя характерные округлые войды. Вблизи кромки венца окрашенные волокна распадаются на отдельные капли различного диаметра (рис. 2, а). Мелкие капли — остатки перемычки, соединяющей первичные капли. Каверна наклонена по отношению к венцу, хотя, как показывают наблюдения, траектория центра масс капли перед столкновением была вертикальной. Потеря симметричной формы каверны, обусловленная отклонением формы капли от идеальной в момент контакта, иллюстрирует неравномерность распределения вещества капли по ее поверхности.

Со временем глубина каверны уменьшается, и в ее центре появляется внутреннее ребро (рис. 2, б). Отдельные фрагменты вещества капли принимают округлые формы, включающие сферы и другие тела вращения. Мелкие капли располагаются на краю венца, нерегулярные области – на дне каверны. Стенки каверны проходят сквозь чернильные фрагменты, которые оста-



**Рис. 3.** Геометрия каверны и распределение окрашенной жидкости капли (раствора чернил) по поверхности: чернила в масле: (a) -D = 0.2 см, H = 60 см; (б–в) D = 5 мм; H = 50 и 65 см.

ются в масле и формируют отдельные окрашенные объемы. Наиболее ярко окрашена вершина зарождающегося всплеска (рис. 2, в).

Типичные картины распределения жидкости капли диаметром D = 0.2 см, падающей с высоты H = 65 см, по поверхности максимально глубокой для условий данного опыта каверны приведены на рис. 3. Верхняя кромка стекающей по внутренней поверхности каверны жидкости образована плавными впадинами, разделенными узкими зубцами. Форма каверны не является идеальной: она искажается и на правой, и на левой сторонах в зоне кромок заострений.

Центральный выступ на дне каверны, образованный погружением капли большего диаметра (рис. 3, 6, H = 50 см, D = 0.5 см) более выражен, охватывающая кольцевая структура отсутствует. Спектр размеров капелек на стенках каверны существенно расширяется в сторону и больших, и меньших размеров.

Увеличение высоты падения приводит к нарушению осевой симметрии картины течения (рис. 3, в, H = 65 см, D = 0.5 см). Окрашенная жидкость собирается в отдельные глобулы, случайное положение которых определяется гидродинамикой контакта жидкостей, в свою очередь зависящей от фазы и формы осцилляций подлетающей капли. Нарушается и регулярность внешней поверхности дна каверны, которое становится вогнутым на отдельных участках. Стекающая жидкость просачивается сквозь стенки каверны и образует в толще масла две глобулы нерегулярной формы справа и слева от ее центра.

В графике изменения высоты всплеска от времени, приведенном на рис. 4, четко выделяется две фазы: начального роста, на которой при t = 10 мс выбрасывается первая капля, при t = 12 мс – вторая, которая заканчивается небольшими уменьшениями высоты всплеска при выбросе очередной капли (моменты выброса капель отмечены штрихами, римские цифры – номера капель). Выброс капель продолжается и на следующей фазе спадания всплеска. Его высота линейно меняется со временем и резко уменьшается при выбросе очередной капли. Значения коэффициен-

тов интерполирующей функции  $f(t) = a_n + b_n t^{\alpha}$  приведены в табл. 1. Всего с вершины всплеска выбрасывается 8 капель (4 капли в фазе роста и 3 капли на кривой спадания). Все капли включают водное ядро в масляной оболочке. Характер временной зависимости сохраняется после вылета новой капли и резкого изменения высоты всплеска.

Сравнение фотографий всплеска при одинаковых условиях показывает, что при сохранении общих особенностей картины отдельные детали (в частности, высота и положение всплеска, число и размер выбрасываемых капель) заметно отличаются. Наклон всплеска связан с отклонением формы капли от осесимметричной и ее осцилляциями в момент контакта, что отмечалось ранее в [7, 16].

Графики зависимостей высоты всплеска от времени для различных высот падения первичной капли приведены на рис. 5, а значения коэффициентов интерполирующей функции h(t) =

 $= a_H (t - k_H)^n + b_H - в$  табл. 2. Различия форм всплеска при различных условиях опыта иллюстрируют боковые фотографии картины течения в фазе максимальной высоты всплеска. Во всех случаях жидкость капли частично собирается на вершине всплеска и выбрасывается в форме вто-



**Рис. 4.** Изменение высоты всплеска, сопровождающего падение капли раствора чернил в масло (D = 0.5 см, H = 40 см): (a) – фото течения; (б) – зависимость высоты всплеска от времени, метки I – VIII при t = 10, 12, 15, 20, 32, 38, 50, 68 мс отмечают вылет очередной капли, штриховые линии – интерполирующие кривые  $f(t) = a_n + b_n t^{\alpha}$  (значения коэффициентов приведены в табл. 2).

ричных составных капель, а также проникает в толщу жидкости в форме "отрывающейся капли" со сферическим оголовком и конической заостряющейся вершиной.

При малой скорости контакта выбрасывается две крупные капли (0.22 и 0.2 см в диаметре) и одна мелкая — 0.06 см (рис. 5а). Максимальное число капель выбрасывается при H = 40 см (U = 2.67 м/c) - 5 капель. Всего одна капля вылетает при скорости контакта U = 3.06 и 3.42 м/c. Все участки кривых аппроксимируются несколькими (двумя или тремя) степенными функциями, показатели которых лежат в диапазоне 0.5-1.5 на начальном участке и четко квадратичными в фазе спадания. Такой характер кривых подчеркивает, что внутренние течения оказывают существенное влияние на общую динамику всплеска на начальном этапе с выбросом капель и малое на основном.

При увеличении скорости контакта мелкой капли с жидкостью соотношение диаметра всплеска и капли уменьшается с 0.9 для H = 25 см до 0.53 для H = 40 см, а затем снова возрастает до 1.7 при H = 65 см.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные опыты показывают, что важную роль в динамике и структуре течения играет "двойной слой" — гладкая контактная поверхность, к которой со стороны примыкает жидкость капли, а с — другой принимающая. В двойном слое уничтожаются свободные поверхности контактов сливающихся жидкостей с газовой фазой, и происходит преобразование доступной потенциальной энергии в другие формы. Толщина двойного слоя, которая оценивается по толщине плоского окончания стримера, составляет менее 0.1 см, а по минимальному диаметру вылетающей капельки менее 0.06 см. Двойной слой движется наиболее быстро, и его наружная кромка

	№ кривой на рис. 4				
	1	2	3	4	
a	0.73	0.07	4.4	3.66	
b	1	1	0.04	0.033	
α	0.33	0.33	1	1	

**Таблица 1.** Коэффициенты интерполирующей функции  $f(t) = a_n + b_n t^{\alpha}$  (рис. 4)



**Рис. 5.** Изменение высоты всплеска (D = 0.5 см,  $h_l = 2$  см): (a – г) – H = 25, 40, 50, 65 см, сплошные линии – интерполирующие функции  $h(t) = a_H (t - k_H)^n + b_H$ , значения коэффициентов  $a_H, k_H, b_H$  и показателя *n* приведены в табл. 3.

на всех стадиях подходит к шеврону венца. С одной стороны он захватывает чернила, а с другой — к его внешней поверхности подтекает масло. Неровная внешняя кромка двойного слоя включает острые выступы, разделяющие пологие впадины. С вершин выступов вылетают капли, включающие обе контактирующие жидкости — и чернила, и масло.

Как структурный элемент двойной слой, играющий важную роль на начальной стадии развития течений, теряет непрерывность с образованием войдов и разделяющих волокон (рис. 1 в; 2 в; 3 в).

Высота падения, <i>H</i> , см	$a_H$	$k_H$	$b_H$	п
25	0.02	0	0.7	1.4
	-0.0007	42	1.66	2
	-0.0007	42	1.3	2
	0.42	0	0.7	0.5
40	-0.0005	43	1.7	2
	0.01	0	0.4	1.4
50	-0.0005	48	1.7	2
	-0.0006	52	1.66	2
	0.01	0	0.45	1.5
65	0.01	0	0.45	1.5
	-0.00058	48	1.6	2

**Таблица 2.** Коэффициенты функции  $h(t) = a_H (t - k_H)^n + b_H$  (рис. 5)

N⁰	Радиус, см	Кинетическая энергия, мкДж	Поверхностная энергия, мкДж
1	0.031	1.12	0.09
2	0.043	1.83	0.18
3	0.041	1.17	0.16
4	0.059	1.89	0.32
5	0.035	0.01	0.11
	Сумма	6.02	0.86

Таблица 3. Энергии вторичных капель

### ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭНЕРГИИ

Полная энергия первичной капли в момент контакта с принимающей жидкостью складывается из кинетической  $E_k$  и доступной потенциальной поверхностной энергии  $E_s$ , обусловленной анизотропией действия атомно-молекулярных сил на контактных границах. При падении капли водного раствора ализариновых чернил диаметром D = 0.5 см с высоты H = 40 см величина полной энергии составляет  $E_{\Sigma} = E_k + E_s = 1.25 \times 10^{-4}$  Дж.

В фазе формирования центральной кумулятивной струи энергия всплеска складывается из потенциальной (гравитационной и поверхностной) энергии самой струи, а также кинетической и поверхностной энергий вторичных капель. Струя имеет сложную структуру, зависящую от энергии первичной капли. При указанной выше энергии капли всплеск включает конический масляный пьедестал. Над пьедесталом и внутри него располагается чернильный столбик, покрытый тонкой масляной пленкой. Таким образом, энергия кумулятивной струи при максимальной высоте складывается из потенциальных энергий масляной и чернильной частей, а также из поверхностной энергии всей струи. Объем масляной части кумулятивной струи на рис. 5, 6 составляет  $V_t = 49.5$  мм<sup>3</sup>, объем чернильной части –  $V_d = 54.22$  мм<sup>3</sup>. Площадь всплеска на границе с воздухом составляет  $S_j^a = 93$  мм<sup>2</sup>, а площадь поверхности чернила-масло с учетом тонкой масляной пленки, покрывающей поверхность чернильного оголовка –  $S_d^t = 111$  мм<sup>2</sup>.

Таким образом, потенциальная гравитационная энергия всей кумулятивной струи составляет  $E_{m.p.} = (\rho_t V_t h_c^t + \rho_d V_d h_c^d)g = 4.42$  мкДж, поверхностная потенциальная энергия –  $E_s = S_j^a \cdot \sigma_{oil} + S_d^t \cdot \sigma_d^t = 3.41$  мкДж, а полная потенциальная энергия кумулятивной струи  $E_{c.j.} = 7.93$  мкДж.

Энергия вторичных капель складывается из кинетической и потенциальных составляющих. Значения радиусов и энергий капелек для всплеска, приведенного на рис. 5 б, указаны в табл. 3. Величина доступной потенциальной поверхностной энергии составляет 18–16% от кинетической энергии у больших капелек и на порядок превышает у самых маленьких. Полная энергия вторичных капель  $E_{s.d.} = 6.88$  мкДж, сравнима с полной энергией кумулятивной струи. Остаточная энергия, потраченная на внутренние течения в принимающей жидкости, составляет  $\Delta E \sim 100$  мкДж.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методами фото- и видеорегистрации детально исследована эволюция картины течения, образующегося в результате падения капли водного раствора чернил в масло. При сохранении общих элементов — каверны, венца, капиллярных волн, всплеска — динамику картины течения в несмешивающихся жидкостях усложняет "двойной слой" — формирующаяся нестационарная контактная поверхность взаимодействующих сред.

Тонкий двойной слой — непрерывная (сплошная) граница контакта двух жидкостей, является наиболее быстрым элементом течения на начальной стадии. Выброшенные с зубцов венца капельки всегда содержат обе контактирующие жидкости, как и в случае смешивающихся сред. Сплошность слоя нарушается в фазе спадания венца. Поскольку раствор чернил быстрее сбегает, чем погружается его верхняя кромка, на внутренней поверхности венца образуют войды – свободные от воды участки масла, разделенные тонкими окрашенными волокнами.

Проведенные опыты показывают заметную зависимость параметров отдельных элементов картины течения от скорости капли в момент контакта с принимающей жидкостью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00598 "Гидродинамика и энергетика капли и капельных струй: формирование, движение, распад, взаимодействие с контактной поверхностью"). Эксперименты проведены на стенде ТБП (стенд для регистрации тонкоструктурных быстропротекающих процессов), входящем в Гидрофизический комплекс для моделирования гидродинамических процессов (УНУ "ГФК ИПМех РАН").

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *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.
- 2. Worthington A.M. A study of splashes. London, Longman & Green, 1908. (Reprinted N.Y., Macmillan, 1963).
- 3. Engel O.G. Crater depth in fluid impacts // J. Appl. Phys. 1966. V. 37. P. 1798-1808.
- 4. Clanet C. Waterbells and Liquid Sheets. Annual Review of Fluid Mechanics. 2007. V. 39 (1). P. 469-496.
- 5. *Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е.* Гидродинамика удара капли: короткие волны на поверхности венца // Доклады Академии наук. 2013. Т. 451. № 1. С. 41–45.
- 6. Eggers J., Villermaux E. Physics of liquid jets // Rep. Prog. Phys. 2008. V. 71. 036601.
- 7. *Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е.* Акустика и гидродинамика удара капли о водную поверхность // Акустический журнал. 2017. Т. 63. № 1. С. 38–49.
- 8. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю*. Полосчатые структуры в картине распределения вещества капли по поверхности принимающей жидкости // Доклады РАН. 2018. Т. 481. № 2. С. 145–150.
- 9. Wang X.S., Liao G.X., Qin J., Fan W.C. Experimental study on effectiveness of extinction of a pool fire with water mist // J. Fire Sci., 2002. V. 20. P. 279–295.
- 10. *Murphy D.W., Li C., d'Albignac V., Morra D., Katz J.* Splash behaviour and oily marine aerosol production by raindrops impacting oil slicks // J. Fluid Mech. 2015. V. 780. P. 536–577.
- 11. Fujimatsu T., Fujita H., Hirota M., Okada O. Interfacial deformation between an impacting water drop and a silicone-oil surface. // J. Colloid. Interface Sci. 2003. V. 264. P. 212–220.
- 12. *Murphy D.W., Li C., d'Albignac V., Morra D., Katz J.* Splash behaviour and oily marine aerosol production by raindrops impacting oil slicks // J. Fluid Mech. 2015. V. 780. P. 536–577.
- 13. *Meckenstock R.U., et al.* Water droplets in oil are microhabitats for microbial life // Science. 2014. V. 345. P. 673–675.
- 14. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика Ч.1. М.: ГИФМЛ, 1963. 584 с.
- 15. Гидрофизический комплекс для моделирования гидродинамических процессов (УСУ "ГФК ИПМех РАН"). Официальный сайт ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН http://www.ipmnet.ru/uniqequip/gfk/#access.
- *Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е.* Трансформации перемычки в процессе отрыва капли // ПМТФ. 2016. № 3. С. 16–31.
- 17. *Rein M*. The Transitional regime between coalescing and splashing drops // J. Fluid Mech. 1996. V. 306. P. 145–165.