

УДК 532.5

ТОНКАЯ СТРУКТУРА КАРТИНЫ РАСТЕКАНИЯ СВОБОДНО ПАДАЮЩЕЙ КАПЛИ В ПОКОЯЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ

© 2021 г. А. Ю. Ильиных^{а,*}, Ю. Д. Чашечкин^{а,**}

^а Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

*E-mail: ilynykh@ipmnet.ru

**E-mail: chakin@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 18.09.2020 г.

После доработки 20.12.2020 г.

Принята к публикации 24.12.2020 г.

Методами высокоразрешающей фото- и видеорегистрации впервые визуализирована тонкая структура картины течения при слиянии с водой в бассейне капли диаметром $0.39 < D < 0.43$ см, падающей со скоростью $3.1 < U < 3.9$ м/с. Исследовано растекание капли воды, водного раствора чернил, медного и железного купоросов. Для всех пар веществ в режиме образования всплеска, в дополнение к каверне, венцу, пелене с зубчатым внешним краем, наблюдались капиллярные волны, излучаемые кольцевой областью слияния жидкостей, а также тонкие струйки на дне каверны и стенках венца. Струйки пронизывают пелену и выступают в форме шипов с вершин зубцов. Последовательности мелких капелек вылетают с вершин шипов, положение которых меняется во времени. Ускорению жидкостей способствует конверсия доступной потенциальной энергии при уничтожении свободных поверхностей сливающихся жидкостей.

Ключевые слова: капля, брызги, пелена, шипы, всплеск, струйки

DOI: 10.31857/S0568528121040083

Длительный период заимствования совершенных геометрических форм быстро сменяющихся образов компонентов капельных течений в живописи, скульптуре и литературе, который наблюдался с античных времен, во второй половине XIX века дополнился научными исследованиями импакта капли — последовательности физических, гидродинамических и акустических процессов, сопровождающих ее слияние с принимающей жидкостью. Наблюдаемая невооруженным глазом трансформация компактной капли в структурированное вихревое кольцо [1] инициировала цикл экспериментальных работ по изучению механизмов формирования завихренности [2], который продолжается и в настоящее время с использованием усовершенствованной фото- и видеотехники [3, 4], аналитически и численно [5, 6].

Уже в первых опытах с использованием искровых источников света и фотографической техники были выделены и другие короткоживущие структурные компоненты капельных течений — каверна, венец, всплеск (также именуемый “кумулятивной струей”, “струйкой Рэлея” или “струйкой Вортингтона”), с вершины которого выбрасываются достаточно крупные капли, а также кольцевые капиллярные волны вокруг венца [7]. Расчеты скорости и кинетической энергии течений, доли диссипировавшей энергии капли в принимающей жидкости и распределения давления выполнены в [8].

Наряду с изучением картины слияния отдельных капель активно изучается взаимодействие с жидкостью капельных систем, образующихся при распаде ламинарных и вращающихся капельных струй, визуализированных в [9]. Формирование глубокой каверны падающей последовательностью капель (капельной струей) прослежено в [10].

Результаты кинорегистрации каверны и всплеска, выполняемой, как правило, в боковой экспозиции, согласуются с данными расчетов на основе уравнений Навье—Стокса в осесимметричной постановке [11]. Уточненные программы расчетов всплеска с учетом тонкого течения (вихревого слоя) на границе принимающей жидкости использованы в [12] (впервые гипотеза существования вихревого слоя на границе капли и принимающей жидкости была выдвинута в [2]). Крупный кольцевой вихрь в толще жидкости [1] начинает формироваться после затухания всех

быстро эволюционирующих структурных компонентов течений — каверны, венца, всплеска, групп кольцевых капиллярных волн вокруг венца [7, 11].

Для изучения механизмов формирования тонких компонентов течений используется техника быстрой регистрации изображений с подсветкой рентгеновскими лучами [13]. Тонкие струйки образуются одновременно с капиллярными волнами внутри венца при падении вторичных капелек и подпитываются быстро преобразующейся в другие формы доступной потенциальной поверхностной энергией при уничтожении свободных поверхностей сливающихся жидкостей [14].

Применение высокоразрешающей техники позволило выделить два вида тонкой плоской пленки жидкостей при первичном контакте капли с жидкостью [15]. Одно плоское кольцо разлетается из области первичного контакта. Второе тонкое кольцо, формирующееся на кромке венца, движется к центру течения.

В процессе слияния в режиме образования всплеска вещество окрашенной капли распределяется по поверхности каверны и венца в чистой воде в виде отдельных волокон [16]. Разделенные принимающей жидкостью цветные волокна располагаются на поверхности каверны, венца и даже попадают в вылетающие мелкие капельки (брызги). В современных теоретических моделях импакта капли, основанных на уравнениях неразрывности и Навье—Стокса, в расчетной схеме течения предполагается, что вещество капли остается в центре каверны [17]. В экспериментах [7, 8] и расчетах [17] основное внимание уделяется анализу общей геометрии крупных компонентов течений — каверны и венца.

Существенные различия в описания тонких деталей картины течений, образующихся в процессе слияния капли с принимающей жидкостью, указывают на необходимость более тщательного изучения динамики ряда одновременно протекающих гидродинамических процессов. В данной работе впервые визуализирована картина течения в окрестности движущейся области контакта кромки капли и поверхности принимающей жидкости с помощью оптических инструментов с согласованным пространственным и временным разрешением.

Опыты выполнены на стенде ТБП, входящем в Уникальную исследовательскую установку “ГФК ИПМех РАН”), в бассейнах размерами $30 \times 30 \times 5$ см и $10 \times 10 \times 7$ см, которые заполнялись частично дегазированной водопроводной водой [18]. Отдельные капли свободно падали из дозатора. Область слияния капли с принимающей жидкостью освещалась прожекторами ReyLab Xenos RH-1000 или светодиодными источниками Optronis MultiLED. Картина течения регистрировалась видеокамерой Optronis CR 300x2 или фотоаппаратом Canon EOS 350D, которые запускались сигналом с фотоприемника, регистрирующего пролет капли. Настройка оптической системы позволяла визуализировать картину течения на погружающемся дне каверны с разрешением до 10 мкм (подробнее методика приведена в [13, 15]).

Параметры процесса — плотности воздуха ρ_a и воды ρ_d (далее $\rho_{a,d}$); кинематическая $\nu_{a,d}$ и динамическая $\mu_{a,d}$ вязкости сред; полный σ_d^a и нормированный коэффициент поверхностного натяжения $\gamma = \sigma_d^a / \rho_d$ ($\text{см}^3/\text{с}^2$); ускорение свободного падения g , диаметр D , площадь поверхности S_d , объем V , масса M , скорость капли U в момент контакта и длительность ее полного слияния $\tau_D = D/U \sim 10^{-3}$ с; доступная потенциальная поверхностная энергия $E_\sigma = \sigma_d^a$, сосредоточенная в приповерхностном шаровом слое толщиной порядка размера молекулярного кластера $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$ см; и кинетическая энергия $E_d = MU^2/2$. Характерное время преобразования доступной потенциальной энергии в другие формы определяется длительностью слияния приповерхностных слоев $\tau_c \sim \delta_\sigma / U \approx 10^{-8}$ с.

Капли воды, водных растворов медного купороса CuSO_4 и железного купороса FeSO_4 , а также разбавленного раствора ализариновых чернил диаметром $0.39 < D < 0.43$ см, свободно падали с высоты $50 < H < 80$ см и формировали в эволюционирующей картине течения выраженную кумулятивную струю [7, 11, 12]. Параметры опытов, которые характеризуются числами: Рейнольдса $12000 < \text{Re} = UD/\nu < 16800$, Фруда $230 < \text{Fr} = U^2/gD < 420$, Бонда $2.1 < \text{Bo} = gD^2/\gamma < 2.5$, Вебера $520 < \text{We} = U^2D/\gamma < 910$, Онезорге $0.0018 < \text{Oh} = \nu/\sqrt{\gamma D} < 0.0019$ — соответствуют режиму образования всплеска. Для воды — $\rho = 0.998$ г/см³, $\gamma = 72.4$ см³/с², $\nu = 0.01$ см²/с при $T = 20^\circ\text{C}$.

Центральную часть фотографии картины течения на рис. 1 занимает погружающаяся капля 1, внешняя кромка которой 2 — область слияния поверхностных слоев контактирующих жидкостей — принимающей и падающей. Именно в этой области и происходит уничтожение свободных по-

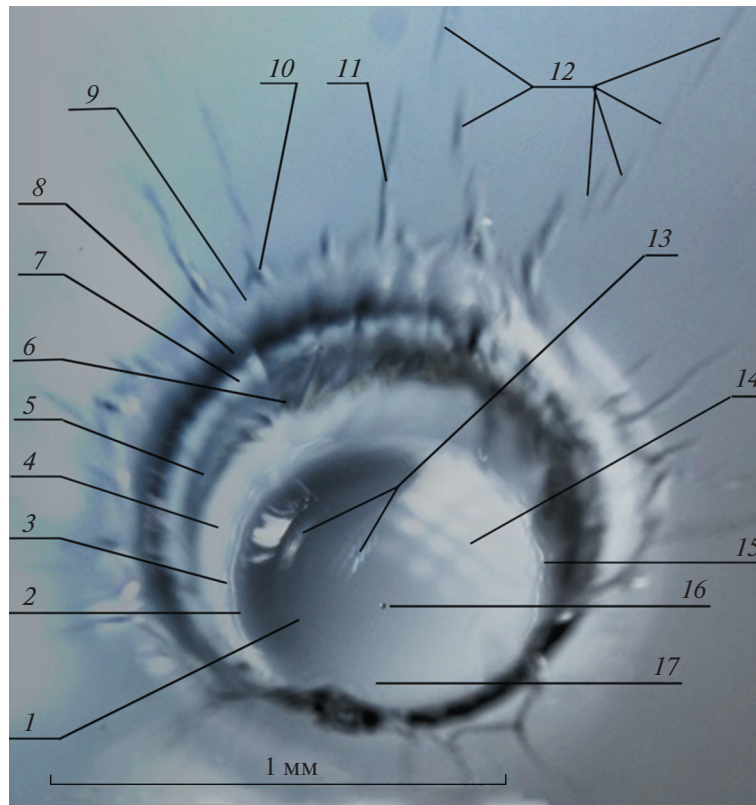


Рис. 1. Растекание свободно падающей капли воды: $D = 0.42$ см, $U = 3.9$ м/с, $Re = 16400$, $Fr = 370$, $We = 900$, $Bo = 2.4$, $Oh = 0.0018$, $t = 0.45$ мс (длина метки – 1 см): 1 – капля; 2 – линия контакта сливающихся жидкостей; 3 – короткие кольцевые капиллярные волны у линии контакта; 4 – дно каверны; 5 – стенка каверны; 6 – струйки (триклы) на стенках каверны; 7 – граница венца; 8 – стенка венца; 9 – тонкая пелена; 10 – зубцы на внешней кромке пелены; 11 – шипы (иглы, стримеры) у вершин зубцов; 12 – брызги, вылетающие с вершин шипов; 13 – кольцевые капиллярные волны на поверхности капли; 14 – решетка на дне; 15 – короткие кольцевые капиллярные волны у линии контакта; 16 – сателлит (остаток слившейся перемычки отрывающейся капли); 17 – короткие капиллярные волны – следы падения капелек брызг на поверхность погружающейся капли.

верхностей и освобождение доступной потенциальной энергии, пропорциональной коэффициенту поверхностного натяжения принимающей σ_i и падающей σ_d жидкостей и изменению площадей dS_i и dS_d : $dE = \sigma_i dS_i + \sigma_d dS_d$. Выделившаяся энергия остается в тонком слое толщиной порядка $\delta_c \sim 10^{-6}$ см (размер молекулярного кластера [19]) по обе стороны относительно положения аннигилировавшей контактной поверхности. В нем сохраняется кинетическая энергия слившейся части капли и освободившаяся доступная потенциальная энергия. Здесь возникают большие возмущения давления, температуры и концентрации вещества, которые разгоняют тонкий слой объединенных жидкостей по поверхности дна каверны и венца.

Движущаяся контактная область с границей 2 излучает короткие кольцевые капиллярные волны 3 длиной λ и частотой ω , которые описываются дисперсионным соотношением $\omega^2 = (2\pi)^3 \gamma / \lambda^3$. Кольцевые волны 3 длиной $\lambda = 0.16, 0.16$ и 0.12 мм хорошо видны на светлом фоне дна каверны 4. Еще одна группа кольцевых волн примыкает к границе капли на другой стороне картины течения (на 4 ч, маркер 15).

Светлая кольцевая полоса 4 на рис. 1 – выпуклое дно каверны, которое переходит в ее стенку – темную полосу 5. Граница между дном и стенкой каверны 6 структурирована, на ней прослеживаются отдельные волокна, ориентированные как в радиальном направлении, так и под некоторым углом к нему. На фоне основных тонких структур, имеющих радиальное направление, выделена область 6, в которой штрихи составляют угол $25\text{--}45^\circ$ к радиус-вектору из центра капли.

Следующая светлая полоса 7 визуализирует границу венца и свободной поверхности. Продолжением внутренней стенки венца 8 служит тонкая пелена 9, которая здесь развернута наружу.

На внешнем изрезанном крае пелены выделены отдельные зубцы 10. С заостренных вершин зубцов вылетают тонкие струйки (шипы 11) диаметром от 0.2 до 0.4 мм. Они располагаются на окружности венца с переменным угловым шагом от 3° до 26° . С вершин шипов последовательно вылетают мелкие капельки (брызги), которые представлены на фотографии отдельными штрихами 12 длиной $1.0 < \delta_s < 2.5$ мм, которые считаются размытыми изображениями быстролетающих капелек. Длина штрихов позволяет оценить скорость капельки $U_s = \delta_s / \Delta t$ в предположении, что она постоянна за время экспозиции $\Delta t = 0.25$ мс. Диапазон скоростей брызг в данном опыте составляет $4.0 < U_s < 10$ м/с.

Изменение углового положения штрихов 12 (к одному шипу примыкает до 5 штрихов с угловым отклонением $2-3^\circ$) свидетельствует о перемещении и развороте вершины шипа. Шипы поднимаются вместе с разлетающейся пеленой, которая постепенно стягивается к вертикальному направлению. Уменьшение длины штрихов свидетельствует о спадании скорости брызг. Скорость первых мелких брызг заметно превышает скорость капли (примерно в 2.5 раза), что указывает на существенное влияние трансформации доступной потенциальной энергии на ускорение жидкости. По мере вязкого вовлечения и диссипации энергии течения жидкости скорость брызг падает.

В направлении на 10 ч на поверхности капли можно видеть систему коротких кольцевых капиллярных волн — след удара мелкой капельки, как и в [20]. Еще одна группа кольцевых капиллярных волн длиной 0.22 мм, бегущих от границы 2 к центру капли 1, визуализируется на каустике в отраженном световом поле 13.

В то же время на больших масштабах поверхность донной части капли может рассматриваться как гладкая, формирующая четкое изображение масштабной маски 14 с шагом 1×1 см, лежащей на дне бассейна глубиной 7 см. Здесь, как и в окрестности границы 2 слева от капли, область слияния жидкостей также излучает короткие капиллярные волны 15, бегущие по дну каверны. Мелкая капелька 16 — остаток слившейся перемычки при отрыве первичной капли, видна вблизи центра изображения.

Наиболее четко зубцы и продолжающие их шипы видны в направлении на 5 ч. В нескольких местах (на 4, 7 и 10 ч) на поверхность капли попадают мелкие брызги, формирующие группы капиллярных волн 17 длиной $\lambda = 0.24$ и 0.36 мм, бегущие, с учетом дисперсионного соотношения для капиллярных волн в вязкой жидкости с групповой $c_g = 2.06$ и 1.69 м/с и фазовой скоростью $c_{ph} = 1.38$ и 1.12 м/с.

Выделенные структурные элементы наблюдаются в картине течения, образованной слиянием капли разбавленного раствора, чернил с водой, представленной на рис. 2 (приведен отдельный кадр из видеогаммы течения). Здесь контрастность элементов течения ниже, чем на рис. 1. Размытость изображения обусловлена более низким качеством матрицы на видеокамере и расфокусировкой изображения, вызванной смещением дна каверны с начальной плоскости, которая использовалась для наводки на резкость. Недостатки качества компенсируются другими достоинствами видеоряда, позволяющими оценить параметры временной изменчивости картины и скорости течений.

Здесь, как и на рис. 1, в центре располагается остаток капли 1, граница которого 2 с дном каверны 3 выражена недостаточно контрастно. Сравнительно однородное распределение цвета в центре изображения сменяется структурированным по мере удаления от него. В картине течения на дне каверны 3 можно выделить кольцевые элементы, отдельные ячейки с окрашенными границами и волокна, располагающиеся на внешней части дна и боковой стенки каверны 4. Здесь также можно видеть границу венца 5 на поверхности принимающей жидкости. На стенках каверны 4 и венца 5 выражены отдельные волокна 7, состоящие из окрашенной жидкости капли. Они разделены светлыми участками, заполненными преимущественно принимающей жидкостью. В структуре сетки прослеживается несколько кольцевых элементов, визуализирующих дно и стенки каверны.

Полосчатая структура сохраняется в области перехода стенки венца 5 в тонкую пелену 6, внешний край которой изрезан заостренными зубцами 8. К зубцам примыкают тонкие струйки (шипы) 9, с вершин которых вылетают быстрые капельки, представленные здесь отдельными штрихами 10. Волокна 7 на стенке каверны 4 плавно переходят в полосы на поверхности венца и продолжают на его пелене (как и в [16]). Шаг между полосами постепенно увеличивается от 0.08 до 0.12 мм. Здесь также видны короткие капиллярные волны 11 длиной $\lambda = 0.37$ и 0.49 мм (как и на рис. 1).

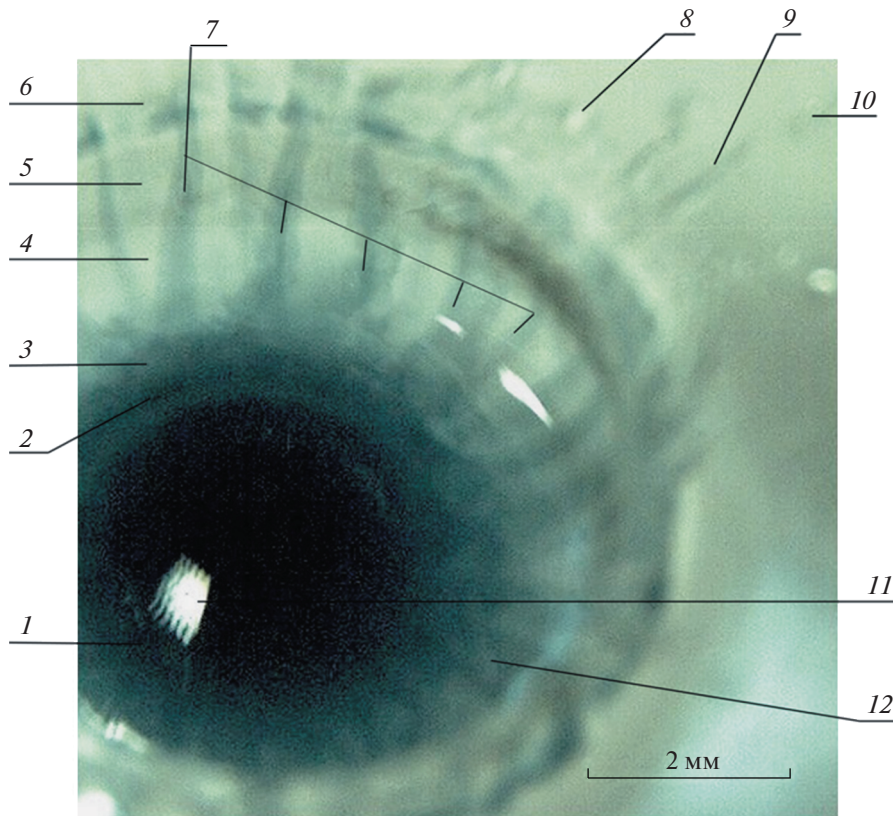


Рис. 2. Растекание капли водного раствора ализариновых чернил в воде при $D = 0.42$ см, $U = 3.1$ м/с, $Re = 13000$, $Fr = 240$, $We = 560$, $Bo = 2.4$, $Oh = 0.0018$, $t = 1.5$ мс, длина метки – 2 мм: 1–12 – аналогично рис. 1.

В области контакта происходит разделение сливающихся жидкостей (дискретизация структуры течений) и формирование радиальных волокон полосчатых структур с шагом от 0.19 до 0.34 мм. Волокна продолжают по всей поверхности венца от области слияния до пелены на вершине шеврона. С вершин зубцов утолщенного шеврона венца выступают шипы со срывающимися каплями. Диаметры вторичных капель со временем увеличиваются и достигают 1 мм, а длины шипов – 1.6 мм. Жидкость капли собирается в окрашенных волокнах на дне каверны, образующих сетку из треугольных, четырех- и пятиугольных ячеек [16], а не распределяется равномерно, как считается в [17].

Представленные тонкие структуры – волокна, резкие границы ячеек, заостренные зубцы, шипы, брызги, устойчиво воспроизводились в каждом из опытов, при этом их параметры – положение, длина, толщина волокон, заметно менялись при повторении эксперимента при неизменных условиях. Тонкие течения ускоряются процессами конверсии доступной потенциальной поверхностной энергии в другие более активные формы – флуктуации давления, температуры и скорости течений в тонком слое контакта сред в окрестности исчезающих свободных поверхностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00598). Эксперименты проведены на стендах УИУ “ГФК ИПМех РАН”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rogers W.B.* On the formation of rotating rings by air and liquids under certain conditions of discharge // *Am. J. Sci. Arts, Second Ser.* 1858. V. 26. P. 246–258.
2. *Thomson J.J., Newall H.F.* On the formation of vortex rings by drops falling into liquids, and some related phenomena // *Proc. R. Soc. London.* 1885. Ser. A 39. P. 417–436.
3. *Mohamed-Kassim Z., Longmire E.K.* Drop coalescence through a liquid/liquid interface // *Phys. Fluids.* 2004. V. 16. P. 2170.

4. *Agbaglah G., Thoraval M.-J., Thoroddsen S., Zhang V., Fezzaa K., Deegan R.D.* Drop impact into a deep pool: Vortex shedding and jet formation // *J. Fluid Mech.* 2015. V. 764. R1-R15.
5. *Cimpeanu R., Moore M.R.* Early-time jet formation in liquid–liquid impact problems: theory and simulations // *J. Fluid Mech.* 2018. V. 856. P. 764–796.
6. *Ray B., Biswas G., Sharma A.* Regimes during liquid drop impact on a liquid pool // *J. Fluid Mech.* 2015. V. 768. P. 492–523.
7. *Worthington A.M.* The splash of the drop. Series “The romance of science”. Published by Society for Promoting Christian Knowledge. E. & J.B. Young & Co. N.Y., 1895.
8. *Engel O.G.* Initial pressure, initial flow velocity, and the time dependence of crater depth in fluid impacts // *J. Appl. Phys.* 1967. V. 38 (10). P. 3935–3940.
9. *Ван-Дайк М.* Альбом течений жидкости и газа. М.: Мир. 1986. 186 с. (перевод Van Dyke M. An album of fluid motion. Stanford, California, USA. 1982. 175 p.)
10. *Hurd R., Fanning T., Pan Z., Mabey C., Bodily K., Hacking K., Speirs N., Truscott T.* Matryoshka cavity // *Phys. Fluids.* 2015. V. 27. 091104.
11. *Castillo-Orozco E., Davanlou A., Choudhury P., Kumar R.* Droplet impact on deep liquid pools: Rayleigh jet to formation of secondary droplets // *Phys. Rev.* 2015. E92.
12. *Gupta G., Kumar P.* Splashing dynamics of a drop impact onto a deep liquid pool with moving film interface // *Physics of Fluids.* 2020. V. 32. 012102.
13. *Lee J.S., Weon B.M., Park S.J., Kim J.T., Pyo J., Fezzaa K., Je J.H.* Air evolution during drop impact on liquid pool // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. 5790.
14. *Chashechkin Yu.D.* Fast superfine components and sound packets in flows induced by a drop impact on a target fluid at rest // *Fluid Dynamics & Material Processing (FDMP).* 2020. V. 16. № 4. P. 773–800.
15. *Thoroddsen S.T.* The ejecta sheet generated by the impact of a drop // *J. Fluid Mech.* 2002. V. 451. P. 373–381.
16. *Ильиных А.Ю., Чашечкин Ю.Д.* Гидродинамика погружающейся капли: линейчатые структуры на поверхности венца // *Изв. РАН. МЖГ.* 2017. № 2. С. 152–165.
17. *Berberovic E., van Hinsberg N.P., Jakirlic S., Roisman I.V., Tropea C.* Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: dynamics of the cavity evolution // *Phys. Rev.* 2009. V. E79. 036306. P. 1–15.
18. УИУ “ГФК ИПМех РАН”: Гидрофизический комплекс для моделирования гидродинамических процессов в окружающей среде и их воздействия на подводные технические объекты, а также распространения примесей в океане и атмосфере: site <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip>.
19. *Эйзенберг Д., Кауцман В.* Структура и свойства воды. Ленинград: Гидрометеиздат. 1975. 280 с.
20. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* Капиллярные волны на поверхности погружающейся в жидкость капли // *ДАН.* 2015. Т. 465. № 4. С. 548–554.