

Formation of a Floating Up Vortex at the Merging of an Ethanol Droplet with Water in the Intrusive Mode

B. Djoudar¹, Yu. D. Chashechkin², A. Yu. Ilinykh²

¹*Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, *Algeria, Oran, El Mnaouar BP 1505, Bir El Djir 31000*

²*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences IPMech RAS, Moscow, Russia, 119526, pr. Vernadskogo, 101-1*

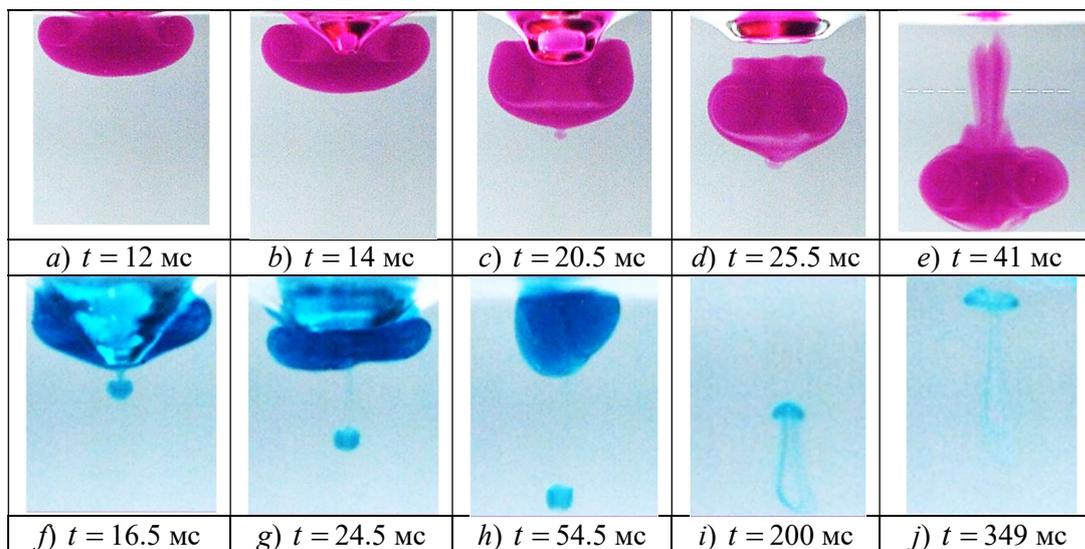
djoudarchahrazad@gmail.com

chakin@ipmnet.ru ilynykh@ipmnet.ru

Abstract

The pattern evolution of a 95 % ethanol aqueous solution drop dyed by brilliant green merging with water was traced using high-speed video recording. In the traditional sequence of flows recorded in the intrusive mode (including the inflow of a drop into the liquid bulk with the formation of a lenticular intrusion, the delayed formation, development and collapse of the cavern, the transformation of the intrusion into a plunging ring vortex) in the merging pattern of a drop of a mixing lighter liquid, a new type of vortex ring is observed. When the maximum depth is reached, a compact volume containing drop matter is separated from the center of the pointed bottom of the cavity into the liquid bulk. The gradually submerging volume transforms into a small annular vortex, which, having reached its maximum depth, stops and forms a compact secondary intrusion of a cylindrical shape. Next, the intrusion, in which the lighter liquid of the drop is partially preserved, begins to float up and gradually transforms into a new ring vortex. The rising vortex leaves a cylindrical trace in the target liquid with a shell colored by the of drop pigment. The diameter of the vortex gradually increases, the trace takes on a bottle-shaped shape.

Keywords experiment, fluids of different densities, intrusion, cavern, submerging and rising vortices, trace.



Flow pattern in the vertical plane at merging of: $a-e$) aqueous solution of KMnO_4 $R_\rho = -0.001$, and $f-j$) colored drop of ethanol (95 %) $R_\rho = 0.1$

УДК 532.5

Формирование всплывающего вихря при слиянии капли этанола с водой в интрузивном режиме

Бошра Джудар¹, Ю. Д. Чашечкин², А. Ю. Ильиных²

¹ Университет науки и технологий им. Мохамеда-Будиафа, Алжир, Оран, 31000, Эль-Мнауар, ВР 1505, Бир-эль-Джир

² Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН), Россия, Москва, 119526, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

djoudarchahrazad@gmail.com

chakin@ipmnet.ru

ilynykh@ipmnet.ru

Аннотация

Эволюция картины слияния капли 95 % водного раствора этанола, подкрашенного бриллиантовым зеленым, с водой прослежена методом высокоскоростной видеорегистрации. В традиционной последовательности течений, регистрируемых в интрузивном режиме, включающей втекание капли в толщу жидкости с образованием чечевицеобразной интрузии, запаздывающее формирование, развитие и коллапс каверны, трансформацию интрузии в погружающийся кольцевой вихрь, в картине слияния капли смешивающейся более легкой жидкости наблюдается кольцевой вихрь нового типа. При достижении максимальной глубины от центра заостренного дна каверны в толщу жидкости отделяется компактный объем, содержащий жидкость капли. Постепенно погружающийся объем трансформируется в небольшой кольцевой вихрь, который, достигнув максимальной глубины, останавливается и образует компактную вторичную интрузию цилиндрической формы. Далее центральная область интрузии, в которой частично сохраняется более легкая жидкость капли, начинает всплывать и постепенно трансформируется в новый кольцевой вихрь. Всплывающий вихрь оставляет в принимающей жидкости цилиндрический след, оболочка которого окрашена пигментом капли. Диаметр вихря постепенно увеличивается, след принимает бутылкообразную форму.

Ключевые слова: эксперимент, разноплотные жидкости, интрузия, каверна, погружающийся и всплывающий вихри, след.

1. Введение

Публикация первого обзора различных способов формирования кольцевых вихрей в жидкостях и газах [1], включавшего, в числе прочих, и описание вихрей в течениях, порождаемых слиянием свободно падающей капли окрашенной жидкости, открыла непрерывно развивающийся цикл исследований собственно капельных течений. Первые работы включали описания короткоживущих и, в тоже время, устойчиво воспроизводимых структурных компонентов – каверны, венца, брызг [2], отдельных вихрей и их каскадов [3]. Постепенно к традиционному гидродинамическому изучению картины капельных течений добавилось рассмотрение влияния электростатических полей [4].

Неожиданные научные результаты, активно инкорпорированные современниками в общенаучные исследования [5], оказали большое влияние на развитие гидродинамики, физики, математики, биологии и многих других наук. Выразительная фотография погружаю-

щегося кольцевого вихря, образующегося при слиянии одиночной капли с водой [6], привлекла особое внимание современников и была воспроизведена на суперобложке популярного трактата [7]. Выборки из кинофильмов, иллюстрирующие эволюцию формы интрузии, содержащей пигментированную жидкость капли, которая постепенно трансформируется в тороидальный вихрь, и каверны приведены в [8]. Визуализация картины течения с помощью рентгеновских лучей позволила предельно сократить длительность выдержки и получить четкие изображения формирующихся кольцевых вихрей и тонких плоских струй жидкости, вылетающих из области слияния капли в воздух [9]. Морфологии картины течения и кинематика кольцевых вихрей прослежены в [10] в широком диапазоне определяющих параметров процесс слияния – диаметра и скорости падающей капли. Фотографии последовательности регулярных распадов кольцевых вихрей импакта капли на множественные струи, формирующие собственные вихри, образующие вихревые ярусы, замеченные еще в [3], приведены в [11]. Множественные разнонаправленные вихри наблюдаются при падении капель на поверхность жидкости с бегущими капиллярными волнами [12]. Эволюция картины столкновения летящих капель этанола и воды визуализирована в [13].

В большинстве опытов с изучением вихревого движения в бассейн с водой падали капли подкрашенной воды, плотность которой, хоть и незначительно, но превосходит плотность принимающей жидкости. В таких условиях действия эффектов плавучести и инерции жидкости, проталкиваемой растущей каверной, однонаправлены. В интрузивном режиме капля вначале плавно втекает в толщу жидкости и формирует чечевицеобразный объем, который проталкивается в толщу жидкости быстро растущей каверной, которая появляется в поле наблюдения с некоторым запаздыванием. Окрашенная интрузия постепенно трансформируется в погружающуюся кольцевой вихрь [14, 15], который плавно замедляется вследствие вязкой диссипации жидкости и вовлечения окружающей среды в расширяющееся течение. Эволюция интрузии при слиянии капли жидкости меньшей плотности, чем принимающей среды, когда эффекты инерционности и плавучести будут действовать в противоположных направлениях, ранее не изучалась. В данной работе впервые проведена визуализация эволюции картины течения при слиянии капли этанола с частично дегазированной водопроводной водой в интрузивном режиме, когда кинетическая энергия капли меньше ее доступной потенциальной поверхностной энергии.

2. Параметризация

Выбор определяющих размерных параметров, характеризующих капельные течения, проведен на основе анализа параметров системы фундаментальных уравнений механики жидкостей – дифференциальных форм законов переноса плотности, импульса и энергии [16]. Жидкость или газ определяется как сплошная текущая среда с внутренней энергией, представляемой дифференциалом потенциала Гиббса $dG = -s_e dT + VdP + S_b d\sigma + \mu_i dS_i$ [17]. Производные потенциала Гиббса G определяют термодинамические величины – плотность ρ и удельный объем $V = 1/\rho$, энтропию s_e , давление P , температуру T , концентрацию растворенных веществ и взвешенных частиц S_i , химический потенциал i -го компонента μ_i , коэффициент поверхностного натяжения σ . Некоторые из величин, в частности, давление и плотность, имеют прямой механический и расширенный физический смысл. Функциональные связи потенциала Гиббса $G = G(\rho, P, T, S_i, \sigma)$ с отдельными термодинамическими величинами, а также плотности с другими параметрами $\rho = \rho(P, T, S_i)$, образуют уравнения состояния, замыкающие систему определяющих уравнений.

Молекулярный перенос импульса, температуры и вещества характеризуют коэффициенты динамической μ_i и кинематической $\nu = \mu/\rho$ вязкости, температуропроводности κ_T и диффузии κ_S . Среду также характеризуют скорости распространения волн (звуковых c_s , электромагнитных c_l), параметры переноса зарядов – удельная электропроводность η и коэффициент преломления света n .

Течения жидкости, которое определяются как внутренне присущий или вынужденный совместный перенос импульса, энергии и вещества, описывает масштабно инвариантная система, все уравнения которой были приведены в первом издании трактата [16], вышедшем в 1944 г. Базовые характеристики течений жидкостей – плотность, импульс, энергия, относятся к классу наблюдаемых величин, методики опытов позволяют оценить погрешность одновременно с определением значения измеряемого параметра. Система фундаментальных уравнений механики жидкостей дополняется физически обоснованными граничными условиями: на твердых стенках кинематическими и динамическими условиями на свободной поверхности. Большая теплоемкость жидкостей позволяет в ряде задач пренебречь температурными эффектами и получать экспериментально проверяемые решения редуцированной системы фундаментальных уравнений, учитывающих гетерогенность плотности и формирующей ее солёности. Полные решения фундаментальной системы включают регулярные функции, характеризующие крупные компоненты течений – струи, следы, волны или вихри, а также сингулярные компоненты, которые описывают волокна и прослойки, образующие тонкую структуру течений [18].

Рассмотрение полной системы уравнений и граничных условий [27–30], применительно к рассматриваемой задаче, показывает, что в число основных размерных параметров изучаемых течений входят потенциалы Гиббса капли G_d , воздушной среды G_a и принимающей жидкости G_t (индексы отмечают принадлежность), плотности $\rho_{d,a,t}$, кинематическая $\nu_{d,a,t}$ и динамическая $\mu_{d,a,t}$ вязкости; полные σ_d^a , σ_t^a и нормированные на плотность жидкости коэффициенты поверхностного натяжения контактирующих сред $\gamma_d^a = \sigma_d^a / \rho_d$, $\gamma_t^a = \sigma_t^a / \rho_t$ см³/с²; коэффициент диффузии окрашивающей каплю примеси в принимающей жидкости κ_d ; эквивалентный диаметр D , площадь поверхности S_d , объем V , масса M , высота свободного падения H и скорость капли U в момент первичного контакта; доступная потенциальная поверхностная энергия (ДППЭ) $E_\sigma = \sigma S_d$, кинетическая энергия $E_k = MU^2/2$, потенциальная энергия в гравитационном поле с ускорением свободного падения g .

Полная энергия падающей сферической капли $E_d = E_p + E_k + E_\sigma$ складывается из потенциальной энергии E_p , экстенсивной кинетической энергии с дифференциалом $dE_k = 0.5\rho U^2 dV$, а также ДППЭ, заключенной в приповерхностном шаровом слое толщиной порядка размера молекулярного ассоциата $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$ см объемом $V_\sigma = \delta_\sigma S_d$ и массой $M_\sigma = \rho V_\sigma$.

Время передачи кинетической энергии E_k и импульса $\mathbf{P}_d = M\mathbf{v}$ капли $\Delta t = D/U$ составляет несколько миллисекунд и на несколько порядков превышает время конверсии ДППЭ $\Delta \tau = \delta_\sigma / U \sim 10^{-8}$ с при уничтожении приповерхностного слоя сливающихся жидкостей толщиной $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$ см. Быстрые процессы преобразования ДППЭ в другие формы на кольцевой границе области слияния жидкостей играют определяющую роль в установлении режима слияния течения [15].

Отношения физических величин образуют наборы собственных временных и пространственных масштабов, определяющих требования к методике измерений в части выбора размера области наблюдения течений, пространственного и временного разрешения инструментов, а также безразмерных отношений, характеризующих капельные течения. Набор традиционных безразмерных параметров включает числа Рейнольдса $Re_d = UD/\nu_d$, Фруда $Fr_d = U^2/gD$, Вебера $We_d = U^2 D / \gamma_d$, Бонда $Bo = gD^2 / \gamma_d^a$, Онезорге $Oh_d = \nu_d / \sqrt{\gamma_d^a D}$, Шмидта $Sc = \nu_t / \kappa_d$. В силу двойственности природы параметров описания свободной поверхности, число Вебера также является одной из мер отношения кинетической и поверхностной энергии капли.

Различия физических свойств контактирующих сред характеризуются безразмерными отношениями, составленными по аналогии с числом Атвуда – относительной разностью плотностей – $R_\rho = \frac{\rho_t - \rho_d}{\rho_t + \rho_d}$, коэффициентов поверхностного натяжения $R_\sigma = \frac{\sigma_t - \sigma_d}{\sigma_t + \sigma_d}$ и ди-

намических вязкостей $R_\mu = \frac{\mu_t - \mu_d}{\mu_t + \mu_d}$.

Степень выраженности быстрых атомно-молекулярных процессов преобразования ДППЭ и передачи кинетической энергии капли характеризуют отношения компонентов энергии $R_E = \frac{E_k}{E_\sigma}$ и их плотностей $R_W = \frac{E_k M_\sigma}{E_\sigma M}$. Отношения компонентов энергии в условиях опытов меняются в широких пределах, плотность поверхностной энергии $W_\sigma = E_\sigma / V_\sigma$ – всегда большая величина в силу малости толщины области ее локализации δ_σ .

Большое число безразмерных параметров задачи отражает сложность пространственно-временной картины течений, эволюционирующей под действием нескольких одновременно протекающих процессов.

3. Методика эксперимента

Опыты выполнены на модифицированном Стенде для изучения тонкой структуры быстропротекающих процессов (ТБП), входящем в состав Уникальной исследовательской установки УИУ «ГФК ИПМех РАН» [19]. Опыты проводились в прозрачных бассейнах размером $10 \times 10 \times 7 \text{ см}^3$ и $30 \times 30 \times 5 \text{ см}^3$. Одиночные капли падали из сменного капилляра дозатора в бассейн, заполненный частично дегазированной водопроводной водой. В качестве капельной жидкости использовался 95 % раствор этанола в воде и 0.01 % водный раствор перманганата калия KMnO_4 . Физические параметры рабочих жидкостей приведены в Табл. 1.

Область течения освещали два многоточечных светодиодных осветителя Optronis MultiLED со световым потоком 7700 лм, световолоконный осветитель Schott KL2500LCD и прожектор ReyLab Xenos RH-1000 мощностью 1 кВт.

Таблица 1

Физические параметры рабочих жидкостей

	$T, ^\circ\text{C}$	Плотность ρ , г/см ³	КПН σ , г/с ²	Норм. КПН γ , см ³ /с ²	Дин. вязкость μ , г/(см×с)	Кин. вязкость ν , см ² /с
Раствор этанола (95 %)	20	0.81	22.7	28	0.014	0.017
Раствор KMnO_4 (0.01 %)	20	1	73	73	0.01	0.01
Вода	20	0.998	72	72	0.01	0.01

Картина течения регистрировалась видеокамерой Optronis CR 300 × 2 или фотоаппаратом Canon EOS 350D. Положение линии визирования выбиралось из условия наибольшей четкости границ компонентов регистрируемой картины. Использовались два варианта регистрации картины течения: в вертикальной плоскости при горизонтальном положении линии визирования $\vartheta = 0^\circ$ или наклонном под углом $\vartheta = 65^\circ$ и 70° при наблюдениях свободной поверхности. Расстояния от линзы до центра области течения выбиралось в диапазоне от 12 до 40 см. Размеры пикселя в опытах лежали в диапазоне от 10 до 50 мкм. Выдержка подбиралась минимальной при задании уровня пространственного разрешения, размера регистрируемой области и требуемой освещенности. Во всех опытах скорость съемки составляла 4000 кадров/с.

При подготовке эксперимента внимание уделялось организации светового потока, позволяющего визуализировать тонкую структуру основных элементов течения – интрузии, каверны, вихрей, волн и распределения вещества капли в принимающей жидкости на всех этапах эволюции течения. Перед каждым опытом проводилась регистрация масштабного маркера.

В опытах после настройки аппаратуры натекающая в капилляр жидкость формировала на его плоском срезе единичную каплю, которая отрывалась под действием собственного веса и свободно падала в принимающую жидкость. В полете капля перекрывала световой луч в фотодетекторе и запускала видеокамеру с регулируемой задержкой (временной шаг 1 мкс). Контактная скорость оценивалась по длительности задержки сигнала с фотоприемника и измерениям положения капли на трех последних кадрах видеофильма, предшествующих контакту и началу втекания в принимающую жидкость. Более подробно описание установки приводится в [20].

4. Основные результаты

При изучении картин течения, образующихся при слиянии свободно падающей капли, смешивающейся с принимающей жидкостью, при небольших контактных скоростях основное внимание традиционно уделяется формированию вихря и динамике его дальнейшего движения [6, 8]. При этом выбирались жидкости капли равной или большей плотности, чем у принимающей среды $R_\rho < 1$. Условия опыта гармонично объединяли результаты однонаправленного действия основных физических факторов – плавучести, обусловленной разностью плотностей, которая характеризуется плотностным отношением R_ρ , потока импульса и градиента давления при росте каверны, способствующих формированию и последующему погружению вихревого кольца. Детальный анализ эволюции картины течения на начальном этапе формирования каверны, образующейся с некоторым запаздыванием после втекания капли в толщу принимающей жидкости, проведен в [20].

Как показывает сравнение данных условий опытов [6, 14, 15], даже небольшой разности плотностей сливающихся жидкостей достаточно для обеспечения устойчивого погружения образующегося вихревого кольца, заполненного окрашенной жидкостью капли. Исследования слияния капель более легкой жидкости (этанола и его растворов) с водой проведено в [13], однако при этом не проводились регистрация картины переноса веществ капли в покоящейся жидкости.

В проведенной серии опытов прослежена эволюция картины переноса вещества капли и с большей, и с меньшей плотностью по сравнению с плотностью покоящейся принимающей жидкости. Из ряда жидкостей с большей плотностью, чем воды, выбран раствор перманганата калия. Интенсивная окраска такого раствора позволяет наблюдать эволюцию картины течения при низкой концентрации пигмента (в данных опытах – 0.01 % по массе). Детальная регистрация картины течения при слиянии капли более легкой жидкости с водой проведена впервые. Изучено слияние свободно падающего подкрашенного 95 % раствора этанола, смешивающегося с водой в любых пропорциях, в интрузивном режиме течения, когда величина доступной потенциальной поверхностной энергии капли превышает ее кинетическую энергию $R_E = E_k/E_\sigma < 1$. При этом каверна формируется с некоторым запаздыванием [15].

5. Картина течения при слиянии капли раствора перманганата калия с водой

Выборка из видеофильма, иллюстрирующего эволюцию картины слияния капли раствора KMnO_4 с водой при контактной скорости $U = 30$ см/с, приведена на рис. 1 (широкая светлая поперечная полоса на изображении – след капиллярного поднятия жидкости на стенке бассейна). На начальном этапе капля растекается по поверхности жидкости и плавно

втекает в ее толщу, образуя чечевицеобразную интрузию (рис. 1, *a*). Тонкая светлая линия на рисунке – образ свободной поверхности при горизонтальном положении линии визирования. Детальное описание механизма слияния в интрузивном режиме, когда доступная потенциальная поверхностная энергия капли превышает ее кинетическую энергию, приведено в [15].

Утолщение в верхней части капли визуализирует гребень капиллярной волны, бегущей от границы области слияния к вершине капли. Жидкость капли практически полностью втекает в толщу жидкости за время $\Delta t = 4.25$ мс. На периферии интрузии при $t = 9.75$ мс (рис. 1, *b*) выделяются две светлые окружности диаметром $d_c = 0.86$ мм, примыкающие к свободной поверхности. Расстояния между их центрами составляет $r_v = 4.6$ мм. Такое распределение пигмента визуализирует тороидальный вихрь, сформировавшийся в верхней части области интрузии. Оболочка вихря просветляется вследствие захвата принимающей жидкости кольцевым течением на периферии тора, контактирующим со свободной поверхностью. Ядро интрузии окрашено более плотно, чем ее внешняя часть – оболочка интрузии толщиной $\delta r = 0.5$ мм.

Вихревая структура течения становится более выраженной при $t = 12$ мс (рис. 1, *в*). Здесь ядра тороидального вихря диаметром $d_c = 0.96$ мм, расположенные на расстоянии $r_v = 4.7$ мм, разделены светлыми полосами конической кольцевой струи, охватывающей центральное цилиндрическое ядро первичной интрузии. Анализ видеопленки показывает, что утолщение светлой линии на верхней кромке каверны связано с началом формирования каверны.

Далее каверна конической формы быстро растет, и при $t = 14$ мс (рис. 1, *г*) ее глубина достигает $h_{ca} = 1.55$ мм, а ширина составляет $d_{ca} = 4.7$ мм. В картине интрузии, верхняя плоская кромка которой отделяется от свободной поверхности на высоту $\Delta h_{in} = 0.37$ мм, четко выражены вихревые ядра, просветленная центральная часть и сохраняющая свои свойства оболочка.

Форма каверны меняется по мере ее углубления и при $t = 17$ мс (рис. 1, *д*) заметно увеличивается диаметр ее уплощенной нижней границы. В окрашенной жидкости четко выражены ядра сечения вихря диаметром $d_c = 1.42$ мм, расположенного в верхней части интрузии. Нижняя граница вихря прорисована более светлой горизонтальной линией, включающей растекающуюся жидкость центральной струи. Неоднородность нижней кромки интрузии диаметром $d_{in} = 6.1$ мм визуализирует процесс формирования быстрой вертикальной струйки с вихревым оголовком, вторгающейся в принимающую жидкость. Распределение темных и светлых пигментных пятен на стенке каверны визуализирует сложную аксиально неоднородную геометрию бегущих капиллярных волн. В верхней части каверны поля выражены кольцевые элементы.

Тороидальный вихрь внешним диаметром $d_{vo} = 5.8$ мм с вихревым ядром диаметром $d_c = 1.75$ мм, высотой $h_{vo} = 1.7$ мм заполняет основную часть области окрашенной жидкости интрузии при $t = 20.5$ мс (рис. 1, *e*). Верхняя часть интрузии отстоит на расстоянии $\Delta h_{in} = 1.35$ мм от свободной поверхности. Светлая горизонтальная линия в нижней части пятна визуализирует нижнюю кромку тороидального вихря в теле интрузии. В центре нижней кромки интрузии располагается короткая струйка с кольцевым вихорьком диаметром $d_{jv} = 0.5$ мм. Каверна окружена светлой конической областью, иллюстрирующей формирование расходящейся депрессии (отмечена стрелкой на рис. 1, *e*). Со временем ширина депрессии растет, ее дно уплощается.

Достигнув максимальных размеров, каверна начинает быстро схлопываться. При этом втекающая жидкость отделяет интрузию от ее дна и от свободной поверхности в целом. Гофр в распределении краски в остатке каверны визуализирует нелинейные кольцевые капиллярные волны. От дна каверны втекающую жидкость капли – погружающуюся интрузию, которая принимает форму горшка с острым доньшком, отделяет прозрачная полоска толщиной $\Delta h_{in} = 0.52$ мм.

Диаметр ядра вихря постепенно увеличивается и составляет $d_c = 1.8$ мм, высота вихря составляет $h_{vo} = 2.2$ мм (рис. 1, ж). На остатке каверны цилиндрической формы диаметром $d_{ca} = 3.44$ мм и глубиной $h_{ca} = 1.32$ мм выражены три гребня капиллярных волн длиной $\lambda_{ca} = 0.43, 0.53, 0.61$ мм. Светлая коническая область вокруг следа каверны – центрального окрашенного цилиндра – расширяющаяся депрессия свободной поверхности жидкости. Спадание каверны не сопровождается формированием дополнительных вихревых структур (рис. 1, з).

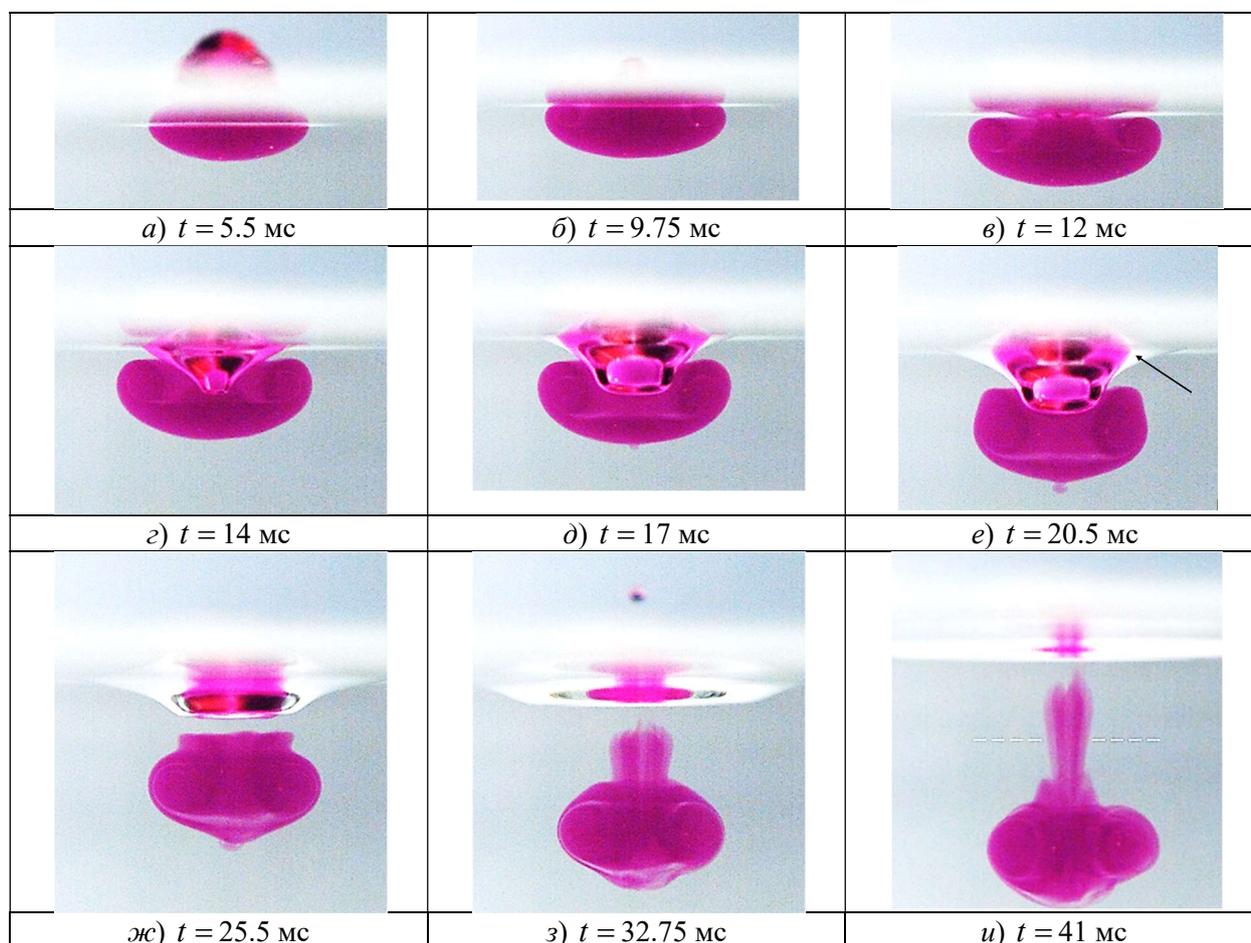


Рис. 1. Картина течения в вертикальной плоскости при слиянии капли раствора KMnO_4 с дегазированной водопроводной водой (разбавление 1:500, $D = 4$ мм, $U = 0.3$ м/с, $E_\sigma = 3.7$ мкДж, $E_k = 1.5$ мкДж, $\text{Re} = 1200$, $\text{Fr} = 2.3$, $\text{We} = 5$, $\text{Bo} = 2.15$, $\text{Oh} = 0.0019$, $\text{R}_E = 0.41$, $\text{R}_W = 15 \times 10^{-6}$, $\text{R}_\rho = -0.001$, $\text{R}_\sigma = 0$)

Погружающийся вихрь с внешним диаметром $d_v = 5.55$ мм и ядрами диаметром $d_c = 1.94$ мм оставляет след, включающий обратный конус, примыкающий вершиной к верхней стенке вихря, и вложенный конус, отмечающий пройденный путь. Отсеченный втекающей жидкостью объем окрашенной жидкости капли сложной формы – цилиндрической в верхней части диаметром $d_{ui} = 2$ мм, выпуклой центральной частью с тороидальным вихрем высотой $h_v = 2.24$ мм и коническим основанием с остатком кольцевого вихря продолжает медленно погружаться и отмечает пройденный путь окрашенным следом. В следе выражена просветленная центральная часть диаметром $d_{cw} = 0.25$ мм, темная кольцевая стенка с внешним диаметром $d_w = 0.8$ мм и светлая оболочка диаметром $d_{ev} = 1.37$ мм (горизонты измерений выделены светлыми штриховыми линиями (рис. 1, у)). Форма головной части постепенно сглаживается, остатки центральной вихревой струйки образуют гладкую слоистую границу области погружающейся жидкости, окрашенной пигментом капли.

Эволюция размеров основных структурных компонентов течения приведена на рис. 2. Следует отметить важную особенность процесса слияния капли в интрузивном режиме – выраженное запаздывание начала процесса формирования каверны [20], которое в данных опытах составляет $t = 11$ мс.

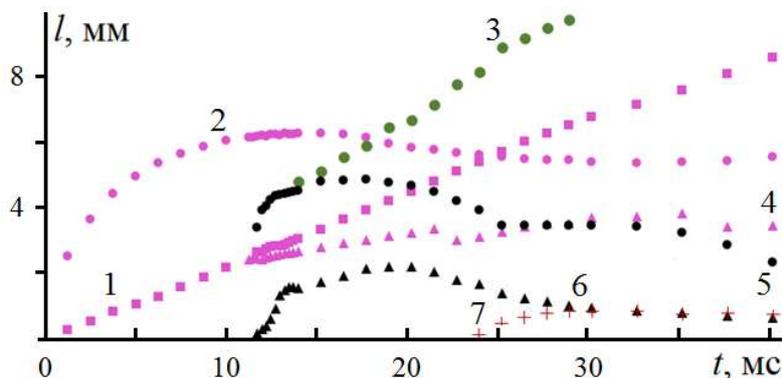


Рис. 2. Эволюция размеров основных компонентов течения: кривая 1 – глубина погружения нижней кромки интрузии $h_{in}(t)$; 2 – диаметр интрузии $d_{in}(t)$; 3 – ширина депрессии $d_d(t)$; 4 – высота интрузии; 5 – диаметр каверны $d_{ca}(t)$; 6 – глубина каверны $h_{ca}(t)$; 7 – отстояние верхней кромки интрузии от дна каверны $\delta h_{in}(t)$

При касании поверхности принимающей жидкости капля начинает энергично растекаться и образует окрашенное круглое пятно, на всей площади которого жидкость капли втекает в толщу принимающей жидкости. В силу запаздывания начала поступления жидкости и уменьшения продолжительности процесса втекания с увеличением расстояния от центра течения, интрузия принимает чечевицеобразную форму (схема течения приведена в [15]). При этом нижняя кромка интрузии равномерно продвигается в толщу принимающей жидкости, ее положение при $0 < t < 30$ мс описывается линейной зависимостью $h_{in}(t) = 0.22t$ мм (рис. 2, кривая 1). Скорость заглубления интрузии, составляющая на начальном этапе $u_{in} = 22$ см/с, с появлением каверны убывает до $u_{in} = 10$ см/с.

На начальном этапе формирования диаметр интрузии аппроксимируется показательной функцией $d_{in}(t) = 2.3t^{1/2}$ мм в интервале $0 < t < 5$ мс и дробно-линейной функцией $d_i(t) = \frac{7.7t}{t+3}$ мм на расширенном интервале $0 < t < 15$ мс (рис. 2, кривая 2). С появлением в поле зрения каверны рост диаметра интрузии замедляется, а при $t > 15$ мс она начинает равномерно стягиваться $d_i(t) = 10t^{-1} + 4.9$ мм на интервале $16.5 < t < 32.75$ мс. При $t > 15$ мс в картине течения появляется коническая депрессия, максимальная ширина которой линейно растет со временем $d_d(t) = 0.33t$ мм (рис. 2, кривая 3).

С появлением каверны верхняя плоская кромка интрузии начинает отделяться от свободной поверхности жидкости, что позволяет одновременно с определением положения нижней кромки проследить изменение во времени высоты области окрашенной жидкости (рис. 2, кривая 4), которая представляется функцией $\Delta h_{in} = 0.1t$ мм.

Наиболее интересный этап эволюции картины течения начинается при $t = 11$ мс, когда в поле зрения появляется каверна диаметром $d_{ca} = 3.37$ мм (рис. 2, кривая 5). На начальном этапе ширина каверны растет достаточно быстро $d_{ca}(t) = 0.9t^{2/3} + 3.3$ мм, а далее переходит в практически линейную зависимость от времени, которая задается функцией $d_{ca}(t) = 0.4t + 3.3$ мм (время здесь везде измеряется в мс). Глубина каверны (рис. 2, кривая 6) интенсивно растет на начальном этапе $h_c(t) = 0.4t^2$ мм в интервале $11 < t < 13$ мс, затем рост замедляется и переходит в линейный со скоростью $u_h = 12$ см/с. Далее каверна начинает схлопываться, ее высота уменьшается $h_c(t) = 10t^{-1} + 0.2$ мм а интервале $21.5 < t < 40.25$ мс.

Изменение расстояния от верхней кромки эволюционирующей области окрашенной жидкости, в которую трансформируется со временем чечевицеобразная каверна, до свободной поверхности иллюстрирует кривая 7.

6. Картина течения при слиянии окрашенной капли этанола с водой

Существенно иная динамика процесса спадания каверны наблюдается при слиянии с водой капли этанола. Здесь, как и в случае падения капли более плотной жидкости, чем принимающая, во всплывающей интрузии, охватывающей коническую каверну со скругленным дном, выражен тороидальный вихрь с диаметром ядра $d_c = 1.28$ мм и расстоянием между центрами $r_c = 4.5$ мм (рис. 3, а).

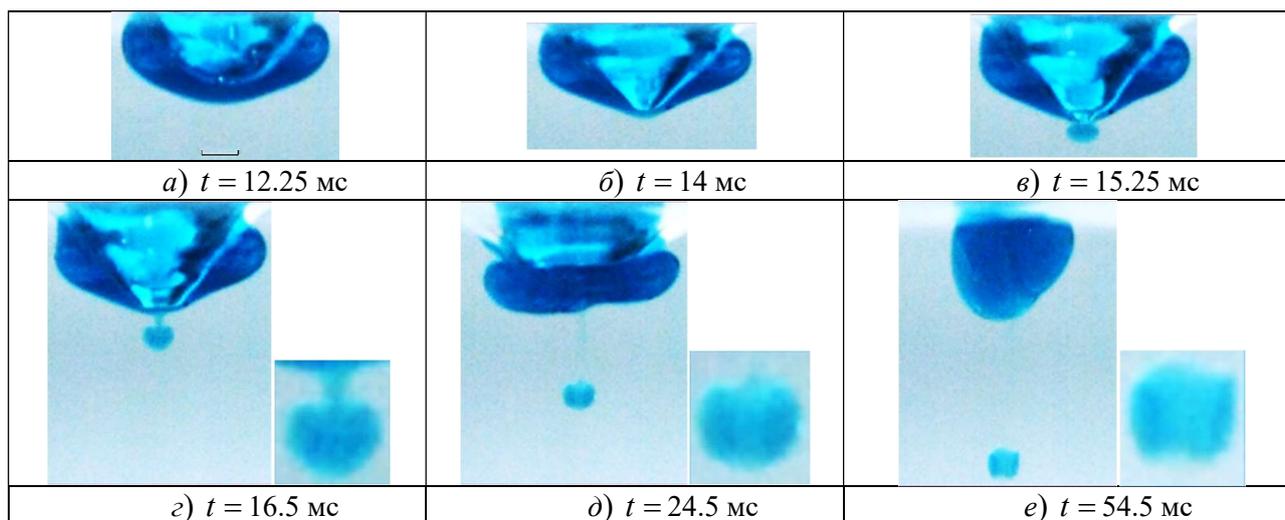


Рис. 3. Картина течения в вертикальной плоскости при слиянии окрашенной капли этанола (95 %) с частично дегазированной водопроводной водой (разбавление 1:500, $D = 3.5$ мм, $U = 0.3$ м/с, $E_\sigma = 0.87$ мкДж, $E_k = 0.82$ мкДж, $Re = 600$, $Fr = 2.6$, $We = 11$, $Bo = 4.3$, $Oh = 0.0055$, $R_E = E_\sigma/E_k = 0.94$, $R_W = 4 \times 10^{-5}$, $R_\rho = 0.01$, $R_\sigma = 0.007$, длина метки – 1 мм

Минимальная толщина окрашенной оболочки интрузии между дном каверны и принимающей жидкостью составляет $d_{ei} = 0.42$ мм. По мере углубления каверна конической формы с углом при вершине заостряется и при $t = 14$ мс фактически прорывает нижнюю часть оболочки интрузии (рис.3, б). Здесь диаметры ядер составляют $d_c = 1.2$ мм, нижний край интрузии принимает коническую форму с углом при вершине $\varphi = 130^\circ$. На поверхности каверны наблюдаются темные и светлые полосы – следы бегущих капиллярных волн.

Новый элемент в картине течения – погружающийся кольцевой вихрь диаметром $d_{vd} = 0.95$ мм, появляется в области пересечения каверны с оболочкой интрузии при $t = 15.25$ мс (рис. 3, в). Здесь диаметры ядер тороидального вихря $d_c = 1.25$ мм, угол при вершине конической нижней кромки каверны $\varphi_c = 85^\circ$. Угол при вершине конуса каверны $\varphi = 125^\circ$. Сформировавшийся вихорек погружается достаточно быстро. Его увеличенное изображение при $t = 16.5$ мс (рис. 3, г) позволяет выделить коническую ножку, полусферический оголовок с двумя более темными пятнами в сечении центрального тора. Дно каверны при этом резко уплощается. Угол при вершине усеченного конуса на дне каверны $\varphi_c = 81^\circ$, угол при вершине конического дна интрузии $\varphi = 130^\circ$.

Сформировавшийся вихрь погружается вертикально вниз и оставляет за собой слабо окрашенный цилиндрический след диаметром $d_{vw} = 0.23$ мм. Остаток интрузии с сохраняющимся кольцевым вихрем внутри примыкает ко дну каверны, нижняя кромка интрузии теряет регулярную форму.

Распределение пигмента на увеличенном изображении при $t = 24.5$ мс (рис. 3, *д*) четко прорисовывает пространственную структуру погружающегося вихря, включающую цилиндрическую ножку, тороидальное кольцо в центре и более светлую оболочку. По окончании полного коллапса каверны при $t = 54.5$ мс (рис. 3, *е*) практически полностью отрезанная интрузия теряет свою вихревую структуру и трансформируется в скругленный аксиально несимметричный конус с неоднородным распределением пигмента внутри.

Совместное действие эффектов плавучести и вязкого трения замедляет движение вихря и приводит к его полной остановке на глубине $h_{vm} = 8$ мм при $t = 70$ мс. Одновременно распределение пигмента внутри него существенно перестраивается и включает коническую более темную оболочку и равномерно окрашенную центральную часть, содержащую более легкую жидкость капли – постепенно разбавляющийся водой раствор этанола. В верхней части остатка вихря намечается формирование всплывающего под действием плавучести остатка погружающегося вихря.

В увеличенной картине течения прослеживается ножка вихря (рис. 4, *а*), окруженная в толще жидкости светлыми цилиндрическими полосами, более темное ядро тороидального вихря, оконтуренное снизу полусферической оболочкой, и внешняя часть объема менее четко выраженной вихревой структуры. В распределении освещенности вдоль линии 1 выражено плавное спадание с тремя минимумами, индуцирующими ядро вихря и остаток центральной струи.

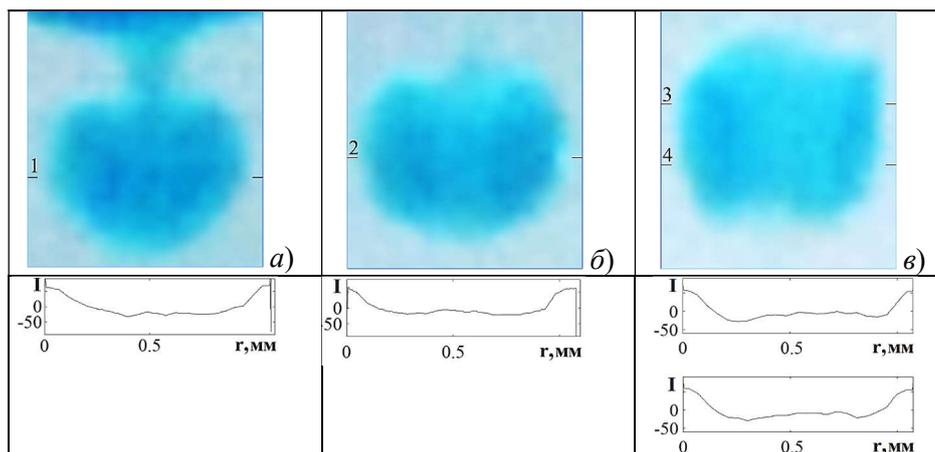


Рис. 4. Фотометрия погружающегося вихря, части полной картины течения, приведенной на рис. 3, *з–е* : *а–в*) $t = 16.5, 24.5, 54.5$ мс, линиями 1–4 отмечены горизонты измерения относительной яркости изображения **I**

Вертикальная ножка погружающегося вихря практически растворилась за $\Delta t = 8$ мс, диаметр ядра увеличился, и в распределении интенсивности на рис. 4, *б* на линии 2 четко выражены два максимума. Внешний диаметр погружающегося объема практически не меняется со временем. Подобное распределение пигмента наблюдается и позднее в застывшем на горизонте нейтральной плавучести погружающемся вихре. Со временем распределение освещенности становится неравномерным по вертикали, и общая картина течения визуализирует более плотно окрашенную оболочку области течения – остаток оболочки вихря, и всплывающую центральную область, постепенно трансформирующуюся в сферический вихрь, а затем и в кольцевой.

Переход от погружения к всплытию объема более легкой жидкости сопровождается изменением картины распределения вещества капли. Дальнейшая эволюция картины течения приведена на рис. 5. Нижняя часть остановившегося объема высотой $h_v = 0.66$ мм принимает коническую форму с углом раскрытия $\varphi_v = 29^\circ$. Она ограничена сверху и снизу двумя кольцевыми линиями. Над верхней кромкой конуса постепенно начинает выступать

полусферический объем окрашенной жидкости (рис. 5, *a*). И нижняя коническая часть, и верхняя сферическая начинают медленно всплывать, причем верхняя часть всплывает быстрее и постепенно отделяется от нижней.

Верхняя полусферическая часть сохраняет компактность, нижняя трансформируется в бутылкообразную поверхность с более плотно окрашенной нижней частью (рис. 5, *б*). Постепенно всплывающий объем принимает форму классического вихря диаметром $d_{vu} = 0.88$ мм с выпуклой передней кромкой, вогнутой донной, за которой остается расширяющийся кольцевой след (рис. 5, *в*). Постепенно картина течения выравнивается, и вихрь, и его след становятся все более симметричными.

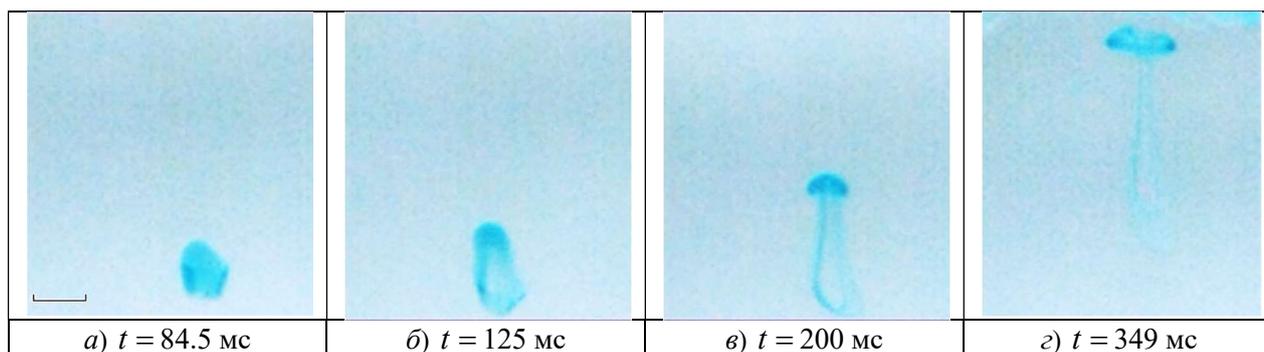


Рис. 5. Эволюция формы всплывающего вихря в картине слияния капли окрашенного этанола с водопроводной водой в интрузивном режиме

Классический кольцевой вихрь с тонкой длинной расширяющийся к основанию ножкой наблюдается при $t > 200$ мс. Яркость окраска следа постепенно снижается вследствие диффузии этанола и пигмента в окружающую среду. Внешний диаметр вихря и диаметр более плотно окрашенной тороидальной части увеличиваются по мере его подъема, одновременно уменьшается диаметр остающегося следа. При приближении к свободной поверхности вихрь начинает более интенсивно расширяться. При этом скорость его всплытия заметно уменьшается.

7. Обсуждение результатов

Проведенная визуализация процесса слияния капли смешивающихся жидкостей в интрузивном режиме показали, что структура картина течения существенно зависит от знака плотностного отношения R_ρ . При слиянии капля жидкости большей плотности ($R_\rho < 0$) образует гладкую чечевицеобразную интрузию, на нижнем полюсе которой формируется небольшая вертикальная струйка с вихорьком. Струйка растекается под нижней кромкой интрузии с образованием тонкослоистой структуры. Каверна, первоначально принимающая коническую форму, быстро трансформируется в усеченный конус со скругленной вершиной и далее коллапсирует. Судя по распределению плотности пигмента, по поверхности каверны бегут короткие, азимутально неоднородные капиллярные волны. В погружающейся интрузии формируется тороидальный вихрь, размеры которого растут по мере его продвижения.

При слиянии капли этанола с водой ($R_\rho = 0.01 > 0$) интрузия более легкой жидкости стремится всплыть и приблизиться к свободной поверхности. При этом она обволакивает боковые стенки конической или прижимается к дну цилиндрической каверны. В фазе максимального заглубления конической каверны с заострения ее дна в толщу жидкости выталкивается компактный объем жидкости, содержащий раствор этанола. Сгусток быстро трансформируется в тороидальный вихрь с тонкой вертикальной ножкой. Вихрь практически неизменного диаметра погружается до горизонта нейтральной плавучести, на котором останавливается и образует компактную вторичную интрузию цилиндрической формы. По-

сле некоторой паузы внешняя часть интрузии – цилиндрическая оболочка – остается на горизонте остановки, а внутренняя часть начинает всплывать. Остаток оболочки деформируется и принимает бутылкообразную форму. Всплывающий объем трансформируется вначале в сферический вихорек, затем – в тороидальный. Всплывающий вихрь растет в размерах и постепенно трансформируется в вихревое кольцо, оставляющее за собой цилиндрический след, переходящий в непрерывно меняющее свою форму бутылкообразное основание – остаток оболочки погружающегося вихорька.

7. Заключение

Методом высокоскоростной видеорегистрации прослежена картина течения при слиянии свободно падающей капли этанола с водой (при плотностном отношении $R_\rho = 0.01 > 0$) в интрузивном режиме. Для сравнения также прослежено слияние капли разбавленного раствора перманганата калия большей плотности, чем плотность воды, $R_\rho = -0.001 < 0$.

На начальном этапе формирования интрузии и каверны картины течения структурно подобны. В стадии максимального углубления с заострения дна каверны в толщу жидкости выбрасывается погружающийся сферический вихорек, содержащий этанол, плотность которого меньше, чем у воды. Достигнув точки поворота, вихорек останавливается и формирует всплывающий объем жидкости.

Всплывающая жидкость трансформируется в кольцевой вихрь, размеры которого постепенно увеличиваются. Прослежена эволюция геометрии основных структурных элементов. Формирование всплывающего вихря при слиянии свободно падающей капли этанола с водой в интрузивном режиме наблюдалось впервые.

Благодарности и ссылка на гранты

Работа выполнена в Лаборатории механики жидкостей ИПМех РАН при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Госзадания, номер госрегистрации: 124012500442-3. Опыты проведены на Стенде для изучения тонкой структуры быстропротекающих процессов (ТБП), входящем в состав Уникальной исследовательской установки «ГФК ИПМех РАН».

Литература

1. Rogers W. B. On the formation of rotating rings by air and liquids under certain conditions of discharge // Amer. J. Sci., Second Ser. 1858. V. 26. Pp. 246–258
2. Worthington A.M. On impact with a liquid surface // Proc. R. Soc. Lond. 1882. V. 34. Pp. 217–230. <https://doi.org/10.1098/rspl.1882.0035>
3. 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. Pp. 417–436.
4. Zeleny J. the electrical discharge from liquid points, and a hydrostatic method of measuring the electric intensity at their surfaces // Phys. Rev. 1914. V. 3(2). Pp. 69–91. DOI:10.1103/PhysRev.3.69
5. Thompson D.W. On growth and form. Cambridge University Press: Cambridge, UK. 1917. 793 p.
6. Okabe J., Inoue S. The generation of vortex ring. Kyushu Univ. // Rep. Res. Inst. Appl. Mech. 1960. V. 8(32). Pp. 91–101.
7. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973. 760 с.
8. Rodriguez F., Mesler R. The penetration of drop-formed vortex rings into pools of liquid // J. Colloid Interface Sci. 1988. V. 121(1). Pp. 121–129. DOI:10.1016/0021-9797(88)90414-6
9. Lee J.S., Park S.J., Lee J.H., Weon B.M., Fezzaa K., Je J.H. Origin and dynamics of vortex rings in drop splashing // Nature Commun. 2015. V. 6(1). DOI:10.1038/ncomms9187
10. Saha A., Wei Y., Tang X., Law C.K. Kinematics of vortex ring generated by a drop upon impacting a liquid pool // J. of Fluid Mech. 2019. V.875. Pp. 842–853. DOI:10.1017/jfm.2019.503

11. Степанова Е.В., Чашечкин Ю.Д. Перенос маркера в составном вихре // Известия РАН. МЖГ. 2010. № 6. С. 12–29.
12. Чашечкин Ю.Д. Перенос вещества окрашенной капли в слое жидкости с бегущими плоскими гравитационно-капиллярными волнами // Известия РАН. Физика атм. и океана. 2022. Т. 58(2). С. 218–229. DOI: 10.31857/S0002351522020031
13. Gao T.-C., Chen R.-H., Pu J.-Y., Lin T.-H. (2005). Collision between an ethanol drop and a water drop // *Exp. in Fluids*. 2005. V. 38(6). Pp.731–738. DOI:10.1007/s00348-005-0952-1
14. Чашечкин Ю. Д., Ильиных А. Ю. Распределение вещества капли в принимающей жидкости в интрузивном режиме слияния // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2022. Т. 23, вып. 6. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-6/articles/1023>
15. 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. DOI:10.3390/axioms12040374
16. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
17. Feistel R. Thermodynamic properties of seawater, ice and humid air: TEOS-10, before and beyond // *Ocean Sciences*. 2018. V. 14. Pp. 471–502.
18. Chashechkin Y. D. Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows // *Axioms*. 2021. V. 10(4). P. 286. <https://doi.org/10.3390/axioms10040286>
19. 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.
Сайт: <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip>
20. Чашечкин Ю. Д., Ильиных А. Ю. Задержка формирования каверны в интрузивном режиме слияния свободно падающей капли с принимающей жидкостью // Доклады РАН. 2021. Т. 496. С. 34–39. DOI: 10.31857/S268674002101003X

References

1. Rogers W. B., On the formation of rotating rings by air and liquids under certain conditions of discharge, *Amer. J. Sci., Second Ser.*, 1858, vol. 26, pp. 246–258.
2. Worthington A. M., On impact with a liquid surface, *Proc. R. Soc. Lond.*, 1882, vol. 34, pp. 217–230. <https://doi.org/10.1098/rspl.1882.0035>
3. 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, vol. 29, pp. 417–436.
4. Zeleny J., The electrical discharge from liquid points, and a hydrostatic method of measuring the electric intensity at their surfaces, *Phys. Rev.*, 1914, vol. 3, iss. 2, pp. 69–91.
DOI:10.1103/PhysRev.3.69
5. Thompson D. W., *On growth and form*, Cambridge University Press: Cambridge, UK. 1917. 793 p.
6. Okabe J., Inoue S., The generation of vortex ring. Kyushu Univ., *Rep. Res. Inst. Appl. Mech.*, 1960, vol. 8, iss. 32, pp.91–101.
7. Batchelor G. K., *An introduction to fluid dynamics*, CUP: Cambridge, UK. 1967. 615 p.
8. Rodriguez F., Mesler R., The penetration of drop-formed vortex rings into pools of liquid, *J. Colloid Interface Sci.*, 1988, vol. 121, iss. 1, pp. 121–129. DOI:10.1016/0021-9797(88)90414-6
9. Lee J.S., Park S.J., Lee J.H., Weon B.M., Fezzaa K., Je J.H. Origin and dynamics of vortex rings in drop splashing. *Nature Commun.* 2015. vol. 6(1). doi:10.1038/ncomms9187
10. Saha A., Wei Y., Tang X., Law C. K., Kinematics of vortex ring generated by a drop upon impacting a liquid pool, *J. of Fluid Mech.*, 2019, vol. 875, pp. 842–853. DOI:10.1017/jfm.2019.503
11. Stepanova E. V., Chashechkin Yu. D., Marker transport in a composite vortex, *Fluid Dyn.*, 2010, vol. 45, no. 6, pp. 843–858. DOI: 10.1134/S0015462810060025

12. Chashechkin Yu. D., Transfer of the substance of a colored drop in a liquid layer with travelling plane gravity–capillary waves, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Phys.*, 2022, vol. 58, no. 2, pp. 188–197. DOI: 10.1134/S0001433822020037
13. Gao T.-C., Chen R.-H., Pu J.-Y., Lin T.-H., Collision between an ethanol drop and a water drop, *Exp. in Fluids*, 2005, vol. 38, iss. 6, pp. 731–738. DOI:10.1007/s00348-005-0952-1
14. Chashechkin Yu. D., Ilinykh A. Yu., Distribution of the drop substance in the target fluid at the coalescence intrusive mode, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2022, vol. 23, no. 6. [in Russian]. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.23.6.1023>
15. Chashechkin Yu. D., Ilinykh A. Y., Intrusive and impact modes of a falling drop coalescence with a target fluid at rest, *Axioms*, 2023, vol. 12, no. 4, p. 374. DOI:10.3390/axioms12040374
16. Landau L. D., Lifshitz E. M., *Fluid Dynamics*, M.: Nauka, 1986. 736 p. [in Russian].
17. Feistel R., Thermodynamic properties of seawater, ice and humid air: TEOS-10, before and beyond, *Ocean Sciences*, 2018, vol. 14, pp. 471–502.
18. Chashechkin Y. D., Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows, *Axioms*, 2021, vol. 10, no. 4, p. 286. <https://doi.org/10.3390/axioms10040286>
19. GFK IPMech RAS: Hydrophysical complex for modeling hydrodynamic processes in the environment and their impact on underwater technical objects, as well as the spread of impurities in the ocean and atmosphere. <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip>
20. Chashechkin Yu. D., Ilinykh A. Y., The delay in cavity formation in the intrusive coalescence of a freely falling drop with a target fluid, *Doklady Physics*, 2021, vol. 66, no. 1, pp. 20–25. DOI: 10.1134/S102833582101002X

Статья поступила в редакцию 1 марта 2024 г.