

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Ильиных А.Ю.
«Экспериментальные исследования гидродинамики всплеска капли»,
представленную на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Объектами исследований в диссертации являются свободно падающая капля, процесс ее погружения в жидкость, течения, возникающие в процессе ее контакта с поверхностью жидкости. Работа чисто экспериментальная, в ней исследована мелкомасштабная гидродинамика всплеска капли на всех стадиях процесса; визуализирована картина распределения капли; изучено влияние основных параметров задачи на картины течения; выявлен механизм тонкоструктурного массопереноса.

Актуальность исследования, помимо многих практических приложений в технологических процессах (к примеру, при переработке нефти, технология струйной печати и т.д.), определяется важностью гидродинамического явления всплеска при столкновениях капель с поверхностью жидкости в естественных водоемах, и, как следствие, в климатических задачах. Именно механизм выброса частиц воды в атмосферу во время дождя во многом определяет эмиссию аэрозолей и с ними различных загрязняющих веществ в атмосферу с водной поверхности. Сейчас этот процесс параметризуется в моделях довольно грубо, и любые исследования гидродинамики эмиссии, особенно экспериментальные, несомненно, представляют научный и практический интерес.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, раздела «Основные результаты и выводы» и списка цитируемой литературы. Промежуточные выводы по главам даются в конце глав, окончательные выводы приводятся в разделе «Основные результаты и выводы». Работа содержит 60 иллюстраций, 9 таблиц. Объем диссертации составляет 150 страниц. Список цитируемой литературы включает 122 работы, 101 - из иностранных источников.

Во **Введении** приводится обзор литературы, обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируются цели и задачи, описываются научная новизна и практическая значимость. Приводятся положения, выносимые на защиту, дается информация об апробации работы. Кратко описывается структура диссертации.

Первая глава посвящена обзору литературы по теоретическим основам гидродинамики погружения капель в толстый слой жидкости. Приводятся размерные параметры задачи динамики всплеска свободно падающей капли, в число которых входят

плотности воздуха, жидкостей капли и принимающей жидкости, кинематические и динамические вязкости, коэффициенты поверхностного натяжения, коэффициенты диффузии вещества капли и маркирующей примеси в принимающей жидкости и т.д.

Приводится система уравнений гидродинамики для вязкой однородной жидкости в декартовой системе координат. Система включает уравнение неразрывности, условие несжимаемости и переноса импульса в гравитационном поле. Следует заметить, что эта система уравнений дальше в работе никак не используется !

Отмечается, что длительность всего процесса погружения капли диаметром 0.3 - 0.5 см, падающей в момент контакта со скоростью 1.0 - 2.5 м/с в жидкость, составляет несколько миллисекунд, а время формирования тонких структур еще меньше. В результате проведенного анализа масштабов движения формулируются требования к эксперименту - экспериментальные исследования гидродинамики всплеска капли должны проводиться преимущественно оптическими методами прямой визуализации с применением соответствующих оптических систем: макрообъективов и теневых приборов.

Во **второй главе** описывается схема экспериментальной установки для визуализации мелкомасштабных быстропротекающих процессов (стенд ТБП, входящий в состав комплекса «УСУ ГФК ИПМех РАН»), даются технические характеристики конструкции с учетом целей и задач проводимого исследования. Приводится описание оптических и электронных схем таких как: блок регулируемых задержек и высокоразрешающий датчик электропроводности, даются оценки пространственно-временного разрешения инструментов.

Описываются принципиальная схема и результаты тестовой работы датчика электропроводности в стратифицированной среде при различных видах входного воздействия. Дается описание конструкции датчика и чувствительного элемента. Динамические свойства датчиков оцениваются при следующих видах входного воздействия: гармонические колебания в среде с однородным градиентом плотности; резкое смещение на небольшую высоту и перемещение преобразователя по высоте с постоянной скоростью.

Визуализация течений осуществляется с помощью теневого прибора ИАБ-458. Вследствие зависимости коэффициента преломления световых лучей от плотности среды бассейн с плоскими стенками, заполненный линейно-стратифицированной жидкостью, эквивалентен оптической призме, поворачивающей лучи на некоторый угол. Осветительная и приемная части расположены в одной вертикальной плоскости напротив

друг друга. Компенсация отклонения лучей осуществляется поворотом теневого прибора на соответствующий угол.

В **третьей главе** приводятся картины течений, инициированных погружением свободно падающей капли в покоящуюся жидкость, описываются стадии процесса (первичное соприкосновение, погружение капли, формирование венца и каверны, образование розетки, кумулятивная струя, тонкая вторичная струя – стример, разбегающиеся капиллярные волны, погружение жидкости и формирование системы вихрей в толще жидкости), анализируются характерные особенности структурных элементов на разных стадиях процесса.

Показано, что при соприкосновении капли с принимающей жидкостью и последующем ее погружении деформация происходит лишь в зоне слияния, непогруженная часть капли остается недеформированной и имеет постоянную скорость вертикального движения. Существенные отклонения от движения верхней границы капли с постоянной скоростью наблюдаются в завершении процесса погружения, когда над поверхностью принимающей жидкости остаются около 5% от диаметра капли.

В **четвертой главе** описывается впервые наблюдаемая пространственная картина распределения вещества окрашенной капли по поверхности каверны и венца. В экспериментах со смешивающимися жидкостями (растворами чернил, окрашенного спирта, глицерина, растворов солей, уксусной кислоты и молоком, падающими в чистую и подкрашенную воду) получено, что вещество капли в принимающей жидкости распределяется неравномерно, собирается в тонких линейчатых элементах – волокнах. В верхнем ряду венца волокна образуют вертикальную линейчатую структуру. На дне каверны возникает сетчатая структура из трех-, четырех- и пятиугольных ячеек.

Разделение вертикальных структур на тонкие нити происходит по мере роста короны. Волокна располагаются по всей внутренней поверхности венца и разделены зонами, не содержащими вещества капли. Под верхним ярусом расположены один или несколько ярусов, заполненных многоугольниками (трех-, четырех- и пятиугольниками). На дне каверны краситель собирается в сетку, также составленную из многоугольников, или формирует центральное пятно.

В **пятой главе** проводится некоторая систематизация картин распределения вещества капли по деформированной поверхности принимающей жидкости, включающая радиус центрального пятна и колец, на которых располагаются узлы сетчатого рисунка, целостность колец, число ярусов и длину ребер сетки. Рассматривается влияние условий экспериментов (высота падения, вязкости и коэффициенты поверхностного натяжения

жидкостей, форма дна) на картину распределения вещества капли смешивающегося и несмешивающегося с принимающей жидкостью.

Показано, что с увеличением высоты падения капли и, следовательно, с увеличением числа Вебера We , линейчатые структуры становятся более тонкими, вещество капли концентрируется в узлах ярусов сетки, возрастает целостность колец, но уменьшается количество ярусов.

В заключение диссертации формулируются основные результаты диссертационной работы. Детальные выводы приводятся в конце каждой главы.

Из наиболее существенных научных результатов, полученных соискателем, необходимо выделить следующие:

1. Разработанная автором методика фото и видеорегистрации всплеска с непрерывными источниками света (лампы накаливания, прожектора, светодиода) дала возможность отследить детальную картину мелкомасштабных ($\delta > 10^{-3}$ см) короткоживущих $\delta t > 10^{-4}$ с компонентов течений, порождаемых падением капли (диаметром $D = 0.3 \div 0.5$ см) в жидкость со скоростью $U = 2 \div 3.5$ м/с на всех этапах процесса.

2. В работе соискателем впервые установлено, что при взаимодействии смешивающихся жидкостей, эмульсий, суспензий на поверхности каверны и венца вещество капли концентрируется в тонких волокнах, образующих ряд структурных уровней. В верхнем ряду венца наблюдаются вертикальные волокна, большинство которых примыкает к основаниям зубцов. В каверне распределение волокон усложняется и в ее центре линейчатый узор сменяется сетчатым. На дне каверны выражены треугольные, а также четырех- и пятиугольные ячейки. Положение и пространственная ориентация волокон сетки со временем меняются. Очень интересный результат !

3. При первичном контакте на поверхности погружающейся капли генерируются короткие капиллярные волны, причем, только при отрицательных значениях относительного коэффициента поверхностного натяжения жидкостей R_σ , при положительных значениях R_σ генерация капиллярных волн не наблюдается.

По диссертации имеются замечания:

1. Нет практически никакой связи с теорией ! Хотя в первой главе в разделах 1.2 и 1.6 и выписываются уравнения движения и термодинамические зависимости, но они нигде в работе не используются. Не ясно, как работает в данном случае дисперсионное соотношение для капиллярных волн ?

2. Если считать, что стримеры шеврона обусловлены капиллярными волнами, то их количество должно определяться длиной шеврона и длиной волны. На рис. 3.5 (стр. 70) длина шеврона составляет около 12.5 мм, указанная длина капиллярных волн около 0.1 мм, откуда следует, что число стримеров должно быть около 120, что на порядок больше, чем на рис. 3.5. Или здесь работает какой-то другой механизм ?
3. Очень интересное фото на рис. 4.13 с ярусной структурой распределения перманганата калия по поверхности дна капли. Сгустки марганцовки, по-видимому, объясняются наложением радиальных и азимутальных капиллярных волн. Но в такое представление не укладывается предлагаемая на рис. 5.1 (стр. 115) схема распределения вещества капли по ее внутренней поверхности. Должна быть, по идее, секториальная структура !

Отмечу, что указанные замечания не являются принципиальными, не влияют на выводы диссертации и не меняют моего положительного мнения об уровне работы. Основное достоинство работы – экспериментальные исследования высокого уровня. **Степень обоснованности** научных результатов и выводов подтверждается экспериментом, а **достоверность** эксперимента подтверждается его воспроизводимостью, что в работе и сделано.

Все результаты исследований автора опубликованы в открытой печати. Автореферат отражает содержание диссертации. Работа полностью соответствует Требованиям п. 9 Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней».

Считаю, что диссертация Ильиных Андрея Юрьевича выполнена на высоком научном уровне, им экспериментально получены новые и интересные результаты, представляющие большой интерес для теоретиков и дающие вклад в развитие гидродинамики. Ильиных А.Ю., безусловно, заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент

Заведующий лабораторией гидродинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН),

д.ф.-м.н., профессор

Зырянов Валерий Николаевич

119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3, ИВП РАН

Телефон: 8-916-1595135

E-mail: v.n.zyryanov@yandex.ru

12.10.201



Зырянов Валерий Николаевич
Верямо: [Подпись] / Перорально