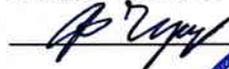


Приложение к Заключительному отчету  
по государственному контракту 16.518.11.7059

Утверждаю

Директор ИПМех РАН

Академик РАН



Ф. Д. Черноусько

« 20 » октября 2015



**ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ УСУ «ГФК ИПМЕХ РАН»**

Руководитель работ по контракту 16.518.11.7059

заведующий лабораторией ИПМех РАН

Профессор



Ю.Д. Чашечкин

В последние годы все большую актуальность приобретает изучение процессов распространения различных веществ в окружающей среде: в гидросфере и атмосфере. Актуальными остаются задачи определения признаков перехода динамики природных систем в катастрофические состояния (засуха, переувлажнение, жара, стойких холод, сильные ветры), локализации и направлений перемещений областей погодных экстремалей.

Развитие экономики сопровождается интенсификацией работ по освоению ресурсов океана и атмосферы, получению во все больших объемах химически и биологически активных веществ, их переработке и транспортировке. Растет объем потерь и степень антропогенного влияния на окружающую среду, погоду, изменчивость климата.

В результате многолетних наблюдений установлено, что большую опасность представляют условия, при которых происходит накопление примесей вредных примесей в приземном слое атмосферы, по поверхности гидросферы, в узких струях течений в атмосфере и океане, которые не находят описания в существующих теоретических моделях.

Отсутствие знаний о физических механизмах и математического описания таких явлений препятствует решению научных и экологических задач. Проведение уточненных экспериментальных исследований, совместимых с расчетами по современным теориям, не требующих дополнительных констант и связей, позволит объективно решить ряд практически важных задач.

Первоначально комплекс уникальных стендов и установок УСУ «ГФК ИПМех РАН» создавался для моделирования эффектов стратификации, их влияния на динамику течений с ориентацией на процессы в толще океана.

В ходе выполнения работ 2009-2010, 2011-2012 гг. по Государственным контрактам по заказу Минобрнауки России комплекс УСУ «ГФК ИПМех РАН» был существенно модернизирован. Согласно программе развития были разработаны методики измерения поверхностных и подводных явлений, распространения и рассеяния звука, а также оптического измерения инерциальных волн [136, 137]. Достигнутые метрологические показатели и диапазоны изменчивости физических свойств моделируемых явлений удовлетворяют Техническому заданию на НИР, выполняемой по Госконтракту 16.518.11.7059.

Для исследования амплитудно-фазовых характеристик нестационарных акустических пучков и возбуждаемого ими поверхностного волнения была разработана и

аппаратно реализована методика лазерных дистанционных измерений, которая позволила провести эксперименты с нестационарными пакетами поверхностных волн, возникающих под действием подводных вихрей и акустических пучков. На этом же этапе работ был усовершенствован стенд ВТК за счет внедрения методики измерения инерциальных волн [138].

Работы по метрологическому обеспечению измерений гидрофизических величин (частоты плавучести, температуры, скорости течения) проводились силами ИПМех РАН. Поверка акустических приборов (микрофона и гидрофона) выполнялась в рамках договора ИПМех РАН с ФГУП "ВНИИФТРИ" [139].

При выполнении настоящего Государственного контракта (16.518.11.7059) были выполнены работы по дальнейшему совершенствованию УСУ «ГФК ИПМех РАН» в соответствии с Программой [136]. На этапе 1 (2011 г.) была реализовано быстродействующее управление комплексным экспериментом, что позволило обеспечить синхронную регистрацию акустических сигналов (под водой и на воздухе) и быстротекущих гидродинамических процессов, сопровождающих падение капли на свободную поверхность жидкости [98]. При достигнутой погрешность синхронизации (не хуже 1 мкс) аппаратное временное разрешение по акустическому и оптическому каналам оказалось не хуже 1 и 50 мкс, соответственно, а минимальное пространственное разрешение по оптическим каналам составило 0.01 мм. Данные показатели соответствуют Техническому заданию (ТЗ, п. 6.1) на НИР.

В дальнейшем на этапе 3 Госконтракта 16.518.11.7058 качество синхронизации оптических и акустических измерительных каналов было кардинально улучшено (в этих целях была произведена закупка специального осветительного оборудования). В результате временное разрешение оптической регистрации оказалось не хуже 20 мкс [54].

В результате теоретических исследований, аналитического и численного моделирования были определены направления развития экспериментальных методик и технической модернизации УСУ "ГФК ИПМех РАН".

Сравнительный анализ симметрий показывает, что из всех систем, которые используются для описания в существующей полноте различных течений жидкости (по традиционным представлениям – ламинарным и турбулентным), особое место занимает фундаментальная система. Система уравнений, выражающая законы сохранения вещества, импульса, внутренней энергии, концентрации растворенных компонент, приведена в Главе 1. Симметрии системы соответствуют основным законам сохранения

(вещества, импульса, энергии) – «первым принципам» механики и не содержат дополнительных инвариантов.

При решении конкретных задач к системе уравнений добавляются физически обоснованные граничные условия. Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований показывают, что даже самые простые течения (бегущие и стоячие периодические волны, изолированные вихри, всплески капель) характеризуются сложной, но устойчиво воспроизводимой структурой, отражающей динамику процесса и, в свою очередь, влияющую на нее.

Таким образом, в качестве научной основы моделирования должна выбираться фундаментальная система уравнений механики стратифицированной жидкости, включающая уравнения переноса тепла и вещества, уравнения состояния для плотности и внутренней энергии.

Масштабный анализ системы позволяет выделить основные параметры течения, как размерные, так и их безразмерные отношения.

Уравнения и граничные условия содержат следующие размерные физические величины:

- плотность среды (отсчетная плотность  $\rho_0$  и ее градиент, характеризующий

стратификацию  $\frac{d\rho_0}{dz}$

- импульс  $\mathbf{P}_0$ ,

- масштабы – пространственные  $\mathbf{L}$  и временные  $T^* = \left\{ T_b, \frac{2\pi}{\Omega_t}, \frac{L_o}{U_0} \right\}$  (период

плавучести для стратифицированных сред; обращения для глобально вращающихся сред с частотой  $\Omega_t$ ; период поворота диагонали вектора скорости в потоках со сдвигом и другие,

- термодинамические параметры – температура  $T_0$  и ее градиент  $\frac{dT_0}{dn}$ ; соленость  $S_0$  и ее

градиент  $\frac{dS_0}{dn}$ , кинетические коэффициенты ( $\nu$ ,  $K_T$ ,  $K_S$ ), коэффициенты теплового

расширения  $\alpha$ , солевого сжатия  $\beta$  и сжимаемости  $\gamma$  в уравнении состояния, другие термодинамические и физические параметры (скорость звука, коэффициент преломления,...).

Некоторые из них приводятся к величинам с размерностью длины, в частности кинетические коэффициенты, характеризующие масштабы тонкоструктурных компонент

$$\text{в сочетании с обратным временным масштабом } \delta_N^v = \sqrt{\frac{v}{N}}, \quad \delta_N^{\kappa_S} = \sqrt{\frac{\kappa_S}{N}}, \quad \delta_N^{\kappa_T} = \sqrt{\frac{\kappa_T}{N}}$$

$$\delta_U^v = \frac{v}{U}.$$

В течении могут возникать структурно выделенные макроскопические структурные компоненты, в частности, волн и вихри, которые характеризуются собственными масштабами – длиной волны  $\lambda$  или поперечным размером вихря  $d_v$ .

Отношения масштабов образуют безразмерные параметры, определяющие условия моделирования спутных течений, струй, следов, волн различной природы (акустических, гравитационных поверхностных и внутренних, инерциальных) и дополняющей крупномасштабные компоненты тонкой структуры различных полей.

К их числу относятся традиционные числа Рейнольдса  $Re = \frac{UL}{\nu}$ , Фруда

$$Fr = \frac{U}{Nd} = \frac{\lambda}{2\pi d}, \quad \text{Пекле } Pe = \frac{UL}{\kappa_S}, \quad \text{а также число Атвуда } At = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$$

и его аналог в случае непрерывной стратификации – шкала масштабов (отношение масштабов

плавучести характерного размера задачи)  $C = \frac{\Lambda}{d}$ . Влияние геометрии течения – наклона

границ по отношению в выделенном направлении – ускорению свободного падения в поле тяжести, направлению угловой скорости в глобально вращающихся средах или средней скорости в равномерных течениях, проявляется и в структуре сил, действующих на препятствие в потоке (сила трения, подъемная сила, боковая), и в природе сложной тонкой структуры. В силу векторной природы импульса и скорости с действием вязкости ассоциированы несколько тонкоструктурных компонент (по крайней мере два в изотермических течениях, а не один *пограничный слой*).

Зависимость плотности от термодинамических параметров – давления  $P$ , температуры  $T$ , концентрации  $S$  порождает ряд дополнительных соотношений:

$$\text{глобальное } R_\Delta = \frac{\alpha \Delta T}{\beta \Delta S} \quad \text{и локальное } R_d = \alpha \frac{dT}{dz} / \beta \frac{dS}{dz} \quad \text{плотностные отношения.}$$

Мнокомпонентность среды, приводящая к зависимости плотности  $\rho = \rho(P, T, S)$  и внутренней энергии среды  $e = e(P, T, S)$  от других термодинамических параметров, обосновывает включение в фундаментальную систему уравнения переноса скалярных переменных – температуры  $T$  и концентрации  $S$ . Учет новых переменных добавляет к числу безразмерных параметров отношения кинетических коэффициентов: кинематической вязкости  $\nu$ , коэффициентов диффузии температуры  $\kappa_T$  и концентрации растворенного (или взвешенного) вещества  $\kappa_S$  – числа Прандтля

$$Pr = \frac{\nu}{\kappa_T}, \text{ Шмидта } Sc = \frac{\nu}{\kappa_S} \text{ и Левиса } Le = \frac{\kappa_T}{\kappa_S}.$$

Общим требованием к методике эксперимента является условие одновременной наблюдаемости и крупномасштабных компонент, характеризующих выделенные элементы течений (следы, вихри волны) и их тонкую структуру.

Первая часть требования накладывает требования на размеры установки, которые должны превосходить характерные макромасштабы изучаемых течений. Выполнение данного условия накладывает ограничения на диапазон скоростей течений на стендах УСУ «ГФК ИПМех РАН», в котором адекватно выполняются условия моделирования.

Вторая часть определяет разрешающую способность методов и приборов. Для стендов УСУ «ГФК ИПМех РАН» она составляет около 0,1 мм, что достаточно для изучения многих типов течений. При необходимости диапазон может быть расширен за счет методов микроскопических оптических наблюдений.

Однако существующая инструментальная база для выполнения контактных измерений нуждается в существенном улучшении.

Настало время разработки методов одновременных измерений всех фундаментальных величин, входящих в определяющую систему, а именно – **плотности, импульса, температуры, концентрации** и других переменных, которые могут быть пересчитаны в скорость звука, показатель преломления и других. Также должны создаваться методы контроля точности непосредственно в ходе измерений.

Адекватные теоретические модели, построенные на базе фундаментальной системы, позволят переносить данные лабораторных экспериментов на течения в природных условиях и технологических аппаратах с гарантированной оценкой погрешности.

Собственные пространственные и временные масштабы течений, описываемые фундаментальной системой уравнений, формируют требования к пространственным и

временным параметрам преобразователей. В случае течений чисто механической природы предел пространственного разрешения задают масштабы Стокса плавучести  $\delta_N^v = \sqrt{\frac{v}{N}}$  или частоты колебаний  $\delta_\omega^v = \sqrt{\frac{v}{\omega}}$ , Прандтля  $\delta_U^v = \frac{v}{U}$  и Пекле  $\delta_N^{KS} = \sqrt{\frac{K_S}{N}}$ . Временные масштабы определяются отношениями характерных масштабов и скоростей  $\tau^* = L/U$  или собственным периодом среды (плавучести  $T_b$ , вращения или колебаний).

Изменения фазового состояния среды (потеря сплошности, фрагментация, слияние объемов, образование брызг и пены) а также особо резкие условия изменения течения могут сопровождаться появлением еще более быстро протекающих процессов. Характерный временной масштаб таких компонент должен определяться в процессе опытов (например, в задаче падения капли на свободную поверхность появляются акустические пакеты с наполнением более 100 кГц).

Для определения плотности в соответствии с уравнением состояния обычно используются данные измерений температуры, концентрации (солёности) и давления. Для определения концентрации используются измерения удельной электропроводности, для пересчета которых в данные плотности используются традиционное (МУСМ – 1980) соотношение или современное уравнение состояния морской среды.

**Состояние измерительной базы.** В настоящее время в лаборатории имеются теневые приборы, гидроакустический комплекс, макеты датчиков температуры, удельной электропроводности и давления собственной разработки, а также образцовый стенд для калибровки датчиков давления.

Программа совершенствования УСУ «ГФК ИПМех РАН» предусматривает изготовление датчиков температуры, удельной электропроводности, скорости звука и давления нового поколения, реализующих достижения современных микро- и нанотехнологий, а также стендов для проведения их статической и динамической градуировки. Знания пространственно-временных передаточных функций необходимо для проведения количественного сравнения данных расчетов и лабораторных измерений.

Имеющиеся теневые приборы и их узкопольные аналоги позволяют регистрировать картину возмущений коэффициента преломления исследуемой среды (методы теневой интерферометрии), а также поля первой (теневой или шлирен-метод с визуализирующей диафрагмой) и вторых производных (прямой теневой метод). Данные таких измерений должны быть включены в интегральную программу обработки данных, реализующую

алгоритм контроля текущей погрешности измерений путем реализации «принципа избыточности» – сравнение расчетов плотности по данным измерений температуры, удельной электропроводности и давления и пересчета вариаций коэффициента преломления. Динамическая погрешность контактных датчиков также может оцениваться по данным сравнения разрезов (вертикальных профилей параметров) и оптических изображений изучаемых течений.

Моностатический и бистатический гидролокаторы УСУ «ГФК ИПМех РАН» в сочетании с прецизионными микрофонами и гидрофонами обеспечивают возможность одновременного проведения оптических и акустических измерений.

В лаборатории (как и во все мире) отсутствуют инструменты и приборы измерений локальных значений импульса (плотности импульса среды). По физической сути, импульс может быть измерен двумя способами: силовым и контролем расхода.

В первом случае сенсор малого размера должен зарегистрировать три компоненты силы и, возможно, три компоненты момента, действующего на образцовое препятствие. Формально говоря, три компоненты силы репрезентативно представляют три компоненты импульса, а три компоненты момента – величину сдвига скорости. Однако в деталях вопрос не исследован ни теоретически, ни экспериментально. Теоретические исследования затрудняет распространенность конститутивных моделей, в рамках которых полностью не решены даже задачи обтекания тел простейшей формы (пластина, сфера, цилиндр). Развиваемый подход на основе полной фундаментальной системы, позволяющий строить необходимые решения, до настоящего времени, полностью не реализован вследствие новизны метода решения сложных задач, которые настойчиво изучаются начиная с середины XVIII века.

Во втором случае необходимо измерять массовый или объемный расходы жидкостей. Некоторые классические результаты механики жидкостей были получены именно таким способом (эксперименты Хагена, Пуайзеля и Рейнольдса по изучению течений в трубах).

Задача измерения расходов имеет большую практическую ценность, учитывая все возрастающую роль трубопроводного транспорта и «цену пограничных конфликтов», вызванных различием методов и методик оценки объемов и масс прокачиваемых жидкостей и газов на границах государств или концевых пунктах трубопроводных систем (экологические проблемы утечек и несанкционированных врезок).

Не меньшую ценность проблема измерения расходов имеет в авиа- и моторостроении.

Создание новых методик и инструментов для измерения импульса требует больших усилий, интеллектуальных и финансовых затрат.

Кроме того, в настоящее время в стране не имеется координирующего научного органа, который мог бы рассмотреть проблему измерения течений жидкостей (газов и их смесей) в полном объеме и решить вопрос о целесообразности и методах совершенствования измерительной базы.

В традиционных монографиях постулируется, что в число определяющих параметров течений входит скорость жидкости [35, 140, 141, 142].

Как показано в Главе 6, данное заключение основано на переносе идей механики твердого тела на течения жидкостей и базируется на гипотезе возможности идентификации «жидкой частицы».

Однако любая часть однородной сплошной среды по определению не имеет границ, отделяющих ее от окружающей среды, и не может быть идентифицирована (физически наблюдаема).

Добавление маркера (твердого тела, окрашенной жидкости или газового пузырька) визуализирует перемещение именно маркера, а не несущей его среды. Перемещение маркера зависит не только от его физических свойств, но и его формы, а также от геометрии течения в целом (как показано в Главе 2 траектории переноса твердотельных и жидких маркеров в вихревом течении не совпадают).

В волновых процессах в поле концентрации маркера появляются образы топографии дна, которые не имеют аналогов в математическом описании течения волн в жидкостях (Глава 3). Таким образом, из теоретического анализа и воспроизводимых результатов непредвзятых экспериментов следует, что **скорость – не наблюдаемый параметр среды**. Иными словами, погрешность ее измерения не может быть объективно оценена, а, следовательно, при некоторых условиях, может быть сколь угодно велика. До настоящего времени не разработаны методики и процедуры сведения данных последовательных измерений скорости различными инструментами к точному значению.

Измеренные значения скорости одних маркеров (твердотельных, жидких или газообразных) или скорости отдельных процессов (распространение звука, других типов волн) не позволяют оценить скорости других и параметры течений жидкости в целом.

Таким образом, возникает необходимость разработки прямых методов измерения **импульса течения**. Подходящих методик измерения импульса и даже их прототипов в настоящее время не существует, что затрудняет оценку интеллектуальных, временных и финансовых затрат на их разработку.

На первом этапе в целях совершенствования собственно стендов УСУ «ГФК ИПМех РАН» необходимо адаптировать существующие гидродинамические весы к измерению малых вариаций сил, обусловленных стратификацией или вращением жидкости в составном вихре на фоне больших значений, обусловленных средним течением.

В последние годы наблюдается большой прогресс в развитии информационно-вычислительных технологий и компьютерного моделирования гидродинамических течений. Ряд стендов УСУ «ГФК ИПМех РАН» оснащен системами сбора и представления результатов измерения параметров течений контактными (зондовые измерители температуры и удельной электропроводности) и дистанционными (оптическим и акустическим) методами. Однако комплекс существует в единственном экземпляре и реализует всего 4 канала. Его уникальные возможности позволили впервые в мировой практике организовать синхронную регистрацию акустического излучения и оптического изображения картины течения, полученного с помощью высокоскоростной видеокамеры.

В случае развития работ потребуется разработка новых современных систем интерфейса «стенд – компьютер» с большим числом каналов (до 16) и улучшенным быстродействием (с 2 до 100 МГц).

В дальнейшем планируются эксперименты влияния многокомпонентной (термохалинной) конвекции на поверхностное волнение и характеристики распространения и рассеяния звука, в связи с чем стенд будет дооснащен системой нагревательных элементов. Данное направление имеет важное прикладное значение для моделирования дистанционного измерения аномалий водной поверхности, вызванных подводными термохалинными процессами. На данный момент основные требования к эксперименту определяются геометрией стенда ЭСП и параметрами имеющихся в его составе генераторов поверхностных волн (акустических и электромеханических): рабочая длина нагревателей – 39 см, диапазон пространственных и временных масштабов неоднородностей температуры  $0.1 \div 10$  см и  $0.01 \div 100$  с, соответственно. Полностью экспериментальная методика и соответствующая аппаратура будут разработаны в 2013 г.

Наиболее неожиданные результаты в ходе выполнения работы были получены на стенде ВТК УСУ «ГФК ИПМех РАН» по переносу маркеров в составном вихревом течении. Впервые экспериментально надежно установлено различие характера переноса твердотельных и жидких маркеров в одном и том же вихревом течении, которое создается

диском, вращающимся на дне цилиндрического контейнера. Объем жидкости в таком течении сохраняется.

В реальных условиях – и в технологических установках и в окружающей среде – одновременно протекают течения различных временных и пространственных масштабов, которые меняют объем жидкости, вовлеченной в течение изучаемого вида (выбранные вихрь, струя или волна).

В этой связи представляет интерес усовершенствование стенда ВТК УСУ «ГФК ИПМех РАН» или разработка нового, позволяющего дискретно или непрерывно изменять объем жидкости в составном вихре. Его эксплуатация позволит определить границы применимости эмпирических закономерностей, характеризующих перенос маркеров в составных вихрях фиксированного объема и исследовать новые важные детали переноса энергии импульса и вещества в вихревых течениях, которые будут иметь важное научное и прикладное значение в силу распространенности таких течений в природе и в технике.

Следует отметить, что с конца 60-х годов прошлого века стенды по изучению эффектов стратификации с использованием методов контактных измерений и теневой визуализации активно эксплуатировались в ряде промышленно развитых стран: США, Великобритании, Германии, Италии, Австралии, Японии, Китае.

В Советском Союзе было создано 5 стендов: в ГОИ имени С.И. Вавилова (СПБ), ЦНИИ имени академика А.Н. Крылова (СПБ), ИПФ РАН (Нижний Новгород), в/ч 90720 (Владивосток), ИПМех РАН. К настоящему времени сохранилось оборудование двух лабораторий (ИПМех РАН, ЦНИИ имени академика А.Н. Крылова), активно эксплуатируется (судя по публикациям новых результатов) только одна (ИПМех РАН). В то же время известно, что даже в Китае стратифицированные течения активно изучают две лаборатории, созданные и оборудованные учеными из ФРГ.

Прогресс в развитии массовых промышленных технологий, создании методов контроля состояния и управления окружающей средой в значительной степени обусловлен уровнем развития фундаментальной механики жидкостей. Развиваемый теоретический подход потенциально позволяет разрабатывать методы адекватного описания гидродинамических процессов и методы управления течениями с гарантированной оценкой результатов. Тестирование в лабораторных условиях позволяет определить точность и границы применимости разработанных моделей процессов. В этой связи сохранение и развитие потенциала лаборатории механики жидкостей ИПМех РАН полезно как для поддержания уровня проводимых исследований, так и для создания научных основ новых технологий, методик рационального использования окружающей

среды, прогноза погоды и изменчивости климата, а также создания эффективных методов управления течениями.

**Выводы:**

Стенды УСУ «ГФК ИПМех РАН» отвечают современным требованиям к установкам для изучения картин течений стратифицированных и вращающихся жидкостей.

Совершенствование стендов требует их дооснащения силоизмерительными инструментами для оценки взаимодействия потока и препятствий.

Актуальной задачей становится разработка и внедрение в практику методик измерений импульса течений, которые, в сочетании с традиционными контактными и дистанционными методами, обеспечат получение полных объемов информации, необходимой для описания, прогноза изменчивости и управления течениями.