

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук Толоконникова Сергея Львовича
на тему: «Аналитический, экспериментальный и численный анализ
течений жидкости со свободными границами»
по специальности 01.02.05 – «механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертация Толоконникова Сергея Львовича многоплановая. Она содержит теоретические, экспериментальные и численные исследования задач о стационарных и нестационарных плоскопараллельных течениях жидкости со свободными границами. В диссертации получены новые точные решения задач о струйных и кавитационных плоскопараллельных течениях идеальной несжимаемой жидкости, имеющих внутренние точечные особенности, построены новые схемы замыкания кавитационных полостей с приложением к задаче о кавитационном обтекании пластины, решены новые задачи о слабо возмущенных струйных течениях, изучены взаимодействия плоской вертикальной струйной преграды с горизонтальным потоком жидкости, экспериментально исследованы автоколебательные режимы фонтанирования вертикальных затопленных струй тяжелой жидкости в установках с водосливным и придонным стоками жидкости, а также автоколебательные режимы взаимодействия горизонтальных соосных монолитной струи воды и окружающей ее кольцевой газовой струи со встречным потоком жидкости, проведены эксперименты по взаимодействию со свободной поверхностью жидкости тонких водяных струй, вытекающих из щелевого конического сопла с вертикальной осью, обнаружены автоколебательные режимы.

Актуальность. Нахождение точных аналитических решений новых задач в классической постановке теории струй идеальной жидкости, их анализ и выявление неизвестных свойств рассматриваемых течений, безусловно, представляет научный интерес и является актуальным.

Закономерности и механизм возникновения регулярных автоколебательных режимов развитых кавитационных течений, создаваемых по методу Л.И.Седова с помощью струи жидкости, выпускаемой навстречу натекающему потоку, ранее никем не исследовались. Их изучение, открывающее новые возможности для практического использования, актуально с теоретической и с практической точек зрения.

Рассмотренные в диссертации задачи взаимодействия свободных и затопленных струй тяжелой вязкой жидкости с покоящейся жидкостью также актуально, т.к. имеют непосредственное отношение к динамике струйных завес, которые широко применяются в технике.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, содержит 240 страниц, 78 рисунков. В списке литературы 186 работ, из них 54 из иностранных источников.

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, описываются цели и направления исследований, приводится анализ работ по проблемам исследований, формулируется научная новизна работы и даются возможные практические приложения полученных результатов, излагаются основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 содержит точные решения новых задач о плоскопараллельных струйных и кавитационных стационарных течениях идеальной несжимаемой невесомой жидкости, содержащих внутренние точечные особенности.

Представлены решения нового класса задач о струйно-кавитационном обтекания областей, ограниченных замкнутой линией тока и содержащих точечные особенности — либо диполь, либо пару вихрей с одинаковыми по величине и противоположными по знаку циркуляциями, либо совокупность «источник-сток». Такие области в дальнейшем именуются «жидкими цилиндрами» или «атмосферами» особенностей. Найденные новые решения с положительными значениями числа кавитации дают возможность построения новых математических схем замыкания развитых кавитационных

полостей на «жидкие цилиндры», представляющие собой «атмосферу» либо диполя, либо пары вихрей с равными по величине, но противоположными по знаку циркуляциями.

В разделе 1.3 этой главы приведены результаты исследования задачи о вихре в плоской струе идеальной невесомой несжимаемой жидкости, движущейся вдоль стенки, имеющей излом с углом при вершине. Вихрь с заданной циркуляцией расположен в точке биссектрисы этого угла на некотором расстоянии от его вершины. В разделе 1.4 содержатся результаты исследования задачи об истечении жидкости через отверстие в стенке при наличии источника на плоскости симметрии течения.

Глава 2 содержит решения нескольких плоских задач о слабо возмущенных струйных течениях с использованием приближенного метода Гуревича-Хаскинда. В разделе 2.1 решены задачи о симметричном и несимметричном взаимодействии встречных струй, вытекающих из каналов, при малых колебаниях изменении давления или скорости в бесконечно удаленных точках каналов. Показано, что по свободной поверхности струи бегут прогрессивные волны.

В разделе 2.2 изучено влияние нестационарности встречных струй на создаваемые ими кавитационные полости. Расчеты, проведенные для случая гармонического закона изменения давления, показали, что по границе каверны наблюдается волнообразование, качественный характер которого согласуется с результатами экспериментов. Амплитуда волны на границе каверны монотонно увеличивается при движении по этой границе от передней кромки каверны и достигает максимального значения в точке, соответствующей миделю каверны.

Глава 3 содержит результаты экспериментальных и численных исследований стационарных и нестационарных течений жидкости со свободной границей. В разделе 3.1 изучена задача взаимодействия плоского горизонтального потока воды в прямоугольном канале с плоской малой

толщины струей воды (водяной струйной завесой), вытекающей вертикально либо из щелевого сопла в дне канала, либо из гребня твердого водослива.

В разделе 3.2 представлены результаты серии экспериментальных и численных исследований процесса фонтанирования плоских вертикальных струй из-под свободной поверхности весомой несжимаемой жидкости в сосудах ограниченного размера. Опыты проводились на установках прямоугольной формы в плане с поверхностным и придонным водосливами. В этих экспериментах были подтверждены некоторые эффекты, полученные ранее в опытах других авторов, и выявлены новые закономерности. Как показали эксперименты, при некоторых диапазонах значений скорости истечения воды в струе, глубины начального затопления и ширины канала, наблюдается четко выраженный устойчивый автоколебательный характер перемещения жидкости над каналом с существенным изменением формы свободной поверхности. Автору удалось из многообразия внешних параметров с использованием П-теоремы скомпоновать один безразмерный параметр, по которому можно разделять бифуркационные режимы фонтанирования. Полученные в экспериментах результаты были дополнены численными расчетами, проведенными использованием пакета программ STAR-CD. По мнению автора диссертации, механизм возникновения автоколебаний — это локальный эффект действия силы тяжести в окрестности проникающей через слой жидкости вертикальной струи.

В разделе 3.3 приведены результаты экспериментального и численного исследования эффектов нестационарного кавитационного взаимодействия в цилиндрической трубе соосных монолитной водяной и кольцевой газовой струй со встречным потоком воды. Ранее в этих экспериментах под руководством Л.И.Седова был обнаружен эффект возникновения автоколебательных режимов кавитационного взаимодействия встречных потоков, при которых точка встречи струи с натекающим потоком и каверна в целом периодически колеблются в продольном направлении. В диссертации автором построены зависимости относительной координаты

носика каверны от времени, зависимости амплитуды перемещения носика каверны и величины максимального продольного перемещения каверны (дальнобойности) от безразмерного массового расхода в струе газа, найдены распределения относительного избыточного давления на оси симметрии трубы в разные моменты времени.

В разделе 3.4 представлены результаты экспериментального изучения гидродинамических эффектов, возникающих при проникании через поверхность жидкости свободных тонкостенных турбулентных струй жидкости, вытекающих из конического щелевого сопла с вертикальной осью. Обнаружены автоколебательные режимы радиального перемещения границ струйного купола свободной поверхности воды с достаточно низкой частотой порядка 2-3 Гц. Описаны бифуркационные смены режимов автоколебаний и гистерезисные эффекты при проведении опытов с разной последовательностью изменения высоты насадка над поверхностью воды.

Заключение содержит основные результаты, полученные в диссертации.

Достоинства диссертации. В диссертации получено много новых интересных и важных результатов и в классической гидродинамике идеальной жидкости и в теории кавитации и струй. В работе использован полный арсенал методов исследования – это и теоретические методы функций комплексного переменного и численное моделирование и эксперименты, что позволило автору теми или иными методами существенно продвинуться в решении поставленных в диссертации гидродинамических задач.

Особо хотелось бы выделить, на мой взгляд, несколько результатов:

1. Обнаруженное теоретически стационарное положение вихря в угле в свободной струе, текущей вдоль стенки с изломом, и гистерезисный характер некоторых положений вихря (раздел 1.3). Гистерезис указывает на то, что при одном и том же положении вихря в потоке

картина течения и действующие на вихрь силы будут разные в зависимости от того, с какой стороны переместили вихрь по биссектрисе угла в эту точку – от вершины угла или со свободной поверхности.

2. Разные амплитуды бегущих по поверхностям прямой и наклонной плоских свободных струй волн в зависимости от возмущения давления на бесконечности в соударяющихся струях (раздел 2.1.2).
3. Автоколебательные режимы горизонтальных перемещений свободной поверхности под действием вертикальных затопленных струй и их бифуркационный характер (раздел 3.2).

По диссертации имеются **замечания:**

1. Возникновение и снос вихревой зоны, полученные в численных экспериментах (рис. 3.8), названы автором автоколебаниями. Но здесь процесс скорее аналогичен генерации вихревой дорожки, а не автоколебаниям.
2. Из результатов численных экспериментов по программе STAR-CD приведена только симметричная картинка фонтанирования (стр. 174, рис. 3.15). Однако, если программа считает правильно, то численная модель должна выйти на периодический режим при возникновении автоколебаний. По-видимому, так и происходило, т.к. на рис. 3.12 приведены периоды автоколебаний, полученные численным расчетом. Но почему-то в работе не приведено ни одной иллюстрации несимметричной формы свободной поверхности, получаемой в численной модели.
3. В главе 3 при описании и анализе результатов по автоколебаниям тонкого плоского фонтана при проникновении через свободную поверхность не хватает хорошей теории. Остается до конца неясной причина возникновения автоколебаний. В диссертации указывается, что механизмом формирования автоколебаний является

локализованный эффект, возникающий под действием силы тяжести на жидкость в окрестности проникающей через слой жидкости вертикальной струи. Но первопричина возникновения этого локализованного эффекта неясна. Или это генерация струей волновых движений в резервуаре, в частности, собственных колебаний, или первопричина – это неустойчивость тонкой плоской струи? О генерации собственных колебаний свидетельствуют длины возбуждаемых волн $2l, 2l/3, 2l/5$. Это первая, третья и пятая мода собственных колебаний по формуле Мериана. Возможно, что суммарное нелинейное взаимодействие неустойчивых мод струи и возбуждаемых волн и является причиной бифуркационного характера смены режимов. Интересно, как бы вела себя струя, если положить сверху крышку? Тогда поверхностные гравитационные волны исчезли бы, а колебания струи остались бы или нет? Или пустить ее наклонно под некоторым углом?

Указанные замечания не являются принципиальными и не влияют на достоверность полученных в диссертации результатов, не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.05 – «механика жидкости, газа и плазмы» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Таким образом, соискатель Толоконников Сергей Львович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий лабораторией гидродинамики
Института водных проблем РАН

Зырянов Валерий Николаевич

« 05 » февраля 2018 г.

Контактные данные:

тел.: (499) 135-54-56, 8-916-1595135

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

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

11.00.08 — океанология

Адрес места работы:

119333, Россия, г. Москва, ул. Губкина, д. 3,
Институт водных проблем РАН, лаборатория гидродинамики
Тел.: (499) 135-54-56; e-mail: tina@iwp.ru

