

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Власовой Ольги Андреевны «**Изучение подъемных сил, действующих на твёрдые тела в жидкостях при вибрациях**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа О.А. Власовой посвящена исследованию воздействия жидкой среды, находящейся в переменном инерционном поле, на свободное твердое тело, погруженное в эту среду. Рассматриваются два вида инерционного воздействия на систему: поступательные вибрации, совершаемые по гармоническому закону, и вращательные вибрации, которые также совершаются по гармоническому закону. В качестве объекта исследования выбраны тела достаточно сложной формы: прямоугольные пластины с острыми и округлыми кромками, цилиндрический стержень конечной длины. Большая часть диссертации посвящена экспериментальному исследованию. Тем не менее, в работе представлен и теоретический анализ. Проводится сравнение теории с экспериментами, результатами других экспериментов.

Актуальность исследования обуславливается тем, что переменные инерционные воздействия встречаются как в естественной среде, так и во множестве технологических приложений. В природе, например, эти воздействия связаны с периодическим движением по орбите гравитирующих масс, оказывающих воздействие на окружающие тела. У переменного инерционного воздействия есть высокий прикладной потенциал, так как системы с неоднородным распределением плотности очень чувствительны к такому воздействию. Эффект может использоваться при управлении фазовыми включениями (например, разделение смеси), при интенсификации процессов переноса и перемешивания (например, это часто важно в химических технологиях), при проектировании транспортных систем. Всё это подталкивает фундаментальные исследования в области вибрационной гидромеханики. Именно этому направлению посвящена диссертационная работа О.А. Власовой.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, в котором дана общая характеристика работы, указаны ее цель, актуальность, новизна, научная и практическая значимость, трёх глав, заключения и списка цитированной литературы, содержащей 117 наименований, включая публикации соискателя. Общий объём диссертации составляет 149 страниц, включая 83 рисунка и несколько таблиц.

Во **введении** представлен обзор литературы по теме диссертации, обозначены цель и задачи исследования, ее новизна, научная значимость, а также приведено краткое содержание диссертации. **Первая глава** включает в себя результаты экспериментального исследования динамики тела в форме пластины заданной толщины в полости с жидкостью, совершающей горизонтальные поступательные колебания. Приведено описание экспериментальной установки и методики исследований. Описана методика проведения экспериментов. Подробно изложены результаты экспериментов для лёгкого тела в жидкости, находящейся под действием поступательных высокочастотных вибраций малой амплитуды; для тяжёлого тела, находящегося под действием тех же высокочастотных вибраций; рассмотрены также результаты при воздействии вибраций сравнительно большой амплитуды.

Во **второй главе** дано теоретическое описание вибрационной подъемной силы, действующей на прямоугольное тело фиксированной толщины и плотности, помещенное в кювету с жидкостью с отличной плотностью. Рассмотрена задача о высокочастотных колебаниях малой амплитуды вдоль горизонтальной оси по гармоническому закону. Обсуждается механизм подъемной силы, действующий на пластину со стороны стенок. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных данных из предыдущей главы.

Третья глава посвящена экспериментальному изучению поведения тяжелого цилиндрического тела в горизонтальной цилиндрической полости, заполненной вязкой жидкостью,

вращающейся с угловой скоростью, которая подвергается модуляции амплитуды по гармоническому закону. Рассматривается динамика тела как при равномерном вращении полости, так и при модуляции скорости вращения.

В **заключении** подведены основные итоги выполненного исследования.

Необходимо отметить, что **большинство результатов** диссертационной работы **получено впервые**. Солидное впечатление оставляет список публикаций соискателя. Здесь присутствуют такие солидные зарубежные и российские журналы как European Physical Journal E, Microgravity Science and Technology, ПМТФ и др. Это также подчеркивает **научную новизну** полученных результатов. Среди **новых результатов**, полученных в диссертации, можно выделить экспериментальное исследование поведения в вибрационном поле твердых тел достаточно сложной формы (прямоугольная длинная узкая пластина с острой и закругленной кромкой, цилиндрический стержень круглого сечения конечной длины). Работы задают новый тренд в вибрационной гидромеханике, когда упор в исследованиях переносится с изучения геометрически симметричных фигур, которые предпочитают теоретики, на более технологичные фигуры, которые можно уже отнести к реалистичным деталям конкретных технологических установок. Для указанных твёрдых тел подробно изучены их динамические режимы поведения в зависимости от значений управляющих параметров системы (вязкость среды, частота и амплитуда вибрационного воздействия), измерены действующие на них со стороны осциллирующей среды объёмные силы. Полученные в работе результаты могут быть использованы в качестве непосредственного указания, как применить наблюдаемый физический эффект при разработке технологий. Кроме того, большой интерес представляет задача о модуляции непоступательного инерционного воздействия, которому посвящено в литературе немного публикаций из-за трудностей такого исследования. Во всём этом, несомненно, заключается **практическая значимость** представленной диссертации.

Приятное впечатление производит оформление диссертации. Орфографических ошибок мало, диссертация хорошо иллюстрирована (83 иллюстраций, большинство из которых составные). О.А. Власова продемонстрировала владение широким инструментарием современного экспериментатора-исследователя: съёмка высокоскоростной камерой, восстановление структуры течения с помощью PIV-методики, стробоскопическое освещение, обработка изображений на компьютере и т.д. Таким образом, **достоверность полученных** новых результатов не вызывает сомнений. Использовались как проверенные временем методы экспериментальных исследований, так и современные методики.

Наиболее сильное впечатление производит третья глава, в которой рассмотрен случай непоступательного инерционного поля, которое к тому же модулировано по величине угловой скорости. Комбинация техники лазерного ножа и PIV-методики позволили восстановить картину мгновенных значений поля скорости, которые выявили сложный трёхмерный характер движения жидкости. За счет сильной неинерциональности, возникающей из-за зависящего от времени углового ускорения, силовое воздействие на цилиндрический стержень кратно возрастает, и система демонстрирует целый ряд новых режимов поведения.

Работа не лишена недостатков и рождает желание в некоторых местах по дискутировать. Остановимся на самых существенных вопросах:

1. Первое замечание касается системы понятийных координат, в которых выполнена данная работа, и которые располагаются несколько в стороне от координат теоретиков. Поясню, что я имею в виду. Всем хорошо известна задача Стокса о прямолинейном и равномерном движении твердого шара радиуса R в вязкой жидкости, решенная в 1851 году. В приближении малости локального числа Рейнольдса была получена формула Стокса для силы сопротивления среды, которая пропорциональна скорости шара U . В 1868 году Стокс рассмотрел более сложную задачу – об обтекании вязкой жидкости

шара, совершающего гармоническое колебательное движение с частотой ω и амплитудой a . В результате решения задачи рядом авторов была получена формула Бассэ – Буссинеска – Осена:

$$F = 6\pi\eta RU + \frac{2}{3}\pi\rho R^3 \frac{dU}{dt} + 6\rho R^2 \sqrt{v\pi} \int_{-\infty}^t \frac{dU}{d\tau} \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}},$$

в которой появляются еще две силы сопротивления. Второе слагаемое здесь носит наименование «сила присоединенных масс». Вообще говоря, присоединенная масса – величина, имеющая размерность массы, которая прибавляется к массе тела, движущегося неравномерно в жидкой среде, для учёта воздействия среды на это тело. Выражение выше говорит, что в предельном случае больших ω к массе самого шара присоединяется масса, равная жидкости, заполняющей половину объема шара. Последнее слагаемое является наследственной силой Бассэ. Она зависит от всей предыстории течения и возникает, когда шар попадает в след своей собственной неустойчивости. Какое из слагаемых является для данной задачи приоритетным определяет параметр нестационарности K , который вводится как отношение радиуса шара к толщине слоя Стокса δ :

$$\frac{R}{\delta} = R\sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} = \frac{1}{\sqrt{8}} K.$$

В случае $K \ll 1$ ведущей силой является сила Стокса. Если $K \gg 1$, то вся динамика определяется силой присоединенных масс. Если же $K \approx 1$, то ведущей силой становится сила Бассэ. Формула выше является замечательным достижением теоретической гидромеханики и составляет основу теоретической «понятийной системы координат». К сожалению в диссертационной работе ни разу не встречается термин «сила Бассэ», «сила присоединенных масс». Даже «сила Стокса» не упоминается ни разу (!!!) Никаких попыток изучить вклад этих сил или хотя бы сделать оценку их вклада в работе нет. Они просто не упоминаются. Вместо этого применяется другая система терминов, которая не очень понятна оппоненту. Например, для твердой тяжелой пластины в одном из характерных режимов её всплытия и беспорядочного рыскания по кювете, можно сделать такую оценку для параметра нестационарности: $K \geq 1$ (толщина пластины 1 см, частота 10 Гц, вязкость 1 ст), откуда ясно, что в этих режимах ведущую роль должна играть сила Бассэ и в меньшей степени – присоединенных масс. Конечно, пластина – не шар, но тем не менее, взаимодействие округлой кромки с набегающим потоком вполне укладывается в данное допущение. Очевидно, что силы нестационарного сопротивления оказывают важнейшее влияние на поведение системы. Эффект присоединенных масс можно заметить в нелинейном отклике моментов отрыва и посадки тела на изменение геометрических параметров тел (например, толщины пластичны). Понятно, что как раз пластина особенно чувствительна к присоединенным массам из-за своей формы. С другой стороны, как только в эксперименте наблюдается не воспроизводящийся тип поведения тела, – это значит на него действует сила Бассэ, которая регулирует движение тела в зависимости от системы случайных вихрей жидкости вокруг тела. Задача выглядит довольно сложно, в системе действует целый комплекс сил.

В связи с этим возникает три вопроса:

- (1) Что соискатель понимает под термином «подъёмная сила», который встречается в диссертации более сотни раз, но так нигде точно и не определяется?
- (2) Пропадает ли эта сила в случае исчезновения стенок сосуда и на каком расстоянии?
- (3) Как соотносится эта подъёмная сила с классическими силами сопротивления качественно и количественно?

Ответы на эти вопросы помогли бы сверить используемые понятия.

2. Вопрос по методике проведения эксперимента: ни на одном из графиков диссертации не поставлены пределы погрешности, с которой получены экспериментальные точки. Казалось бы это рутина и мало на что влияющий момент. Однако, результаты динамического движения левого и правого края пластины на рис. 1.11 можно трактовать и по другому, нежели это делает соискатель. Например, я бы увидел здесь не эллипсы, а торы (квазипериодическое движение), которые получаются при наложении двух периодических процессов. Так как вилки не поставлены, погрешность результатов непонятна, на каком основании здесь автор увидел эллипс – совершенно непонятно.
3. Еще по методике: в работе упоминается леска, которая натянута в углах кюветы, чтобы тело не стучало напрямую по боковым стенкам. Желание сохранить стенки от сильного вибрационного воздействия понятно, однако в тексте нет описания влияния этих лесок. Как часто происходили эти соударения? Если часто, то как можно было бы оценить вклад упругих соударений тела с леской на общую динамику тела?
4. Оппоненту не очень понятна постановка задачи в теоретической главе 2. Первая же формула (2.2), касающаяся твердой фазы выглядит странной. Континуальная скорость для твердой фазы обычно записывается для мелкодисперсной твердой примеси, у каждой частицы которой есть свои степени свободы. В этом случае скорость твердой фазы есть функция не только времени, но и координат. В случае цельного твердого тела (в механике его называют абсолютно твердое тело) характеризовать его движение полевой характеристикой скорости нужды нет: скорость твердого тела определяется тремя компонентами скорости его центра масс и тремя компонентами угловой скорости для вращений вокруг центра масс. Частная производная в формуле (2.2) ставит оппонента в тупик. Более того, та же частная производная по времени стоит и в (2.5), где уж точно осталась одна компонента скорости, которая для единого твердого тела не должна меняться по координатам (тело не деформируется!). Требуются комментарии соискателя по постановке задачи.
5. Последнее замечание. «At last, but not least». В списке литературы диссертации нет ни одной ссылки на оппонента. Между тем, ряд работ оппонента были посвящены близкой теме для данной диссертации - поведению мелкодисперсной тяжелой примеси в жидкости, совершающей вибрации как высокой, так и конечной частоты:

[1] Bratsun D.A., Teplov V.S. On the stability of the pulsed convective flow with small heavy particles // *Eur. Phys. J. A. P.* 2000. – V. 10. – P. 219-230.

[2] Bratsun D.A. Effect of unsteady forces on the stability of non-isothermal particulate flow under finite-frequency vibrations // *Microgravity Sci. Technol.* 2009. – Vol. 21 (Suppl. 1) – P. 153-158.

Оппонент не настаивает на включении ссылок своих работ в диссертацию и свои публикации, но вероятно в этом случае соискатель не должен в будущем обращаться с просьбой об оппонировании к человеку, которого он не считает специалистом в данной области.

Сделанные замечания не умаляют достоинств работы О.А. Власовой, она выполнена на высоком научном уровне и представляет собой ценное научное исследование актуальных проблем механики жидкости. Новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для науки и практики. Достоверность основных представленных в работе результатов не вызывает сомнений. Тема работы соответствует специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы». Основные результаты диссертации представлены в открытой печати в виде 5 статей в журналах из перечня ВАК. Автореферат диссертации правильно и достаточно полно отражает её содержание.

Таким образом, диссертационная работа «Изучение подъемных сил, действующих на твёрдые тела в жидкостях при вибрациях» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертационным работам по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», а ее автор, Власова Ольга Андреевна, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент:
Заведующий кафедрой прикладной физики Пермского национального исследовательского политехнического университета,
доктор физ.-мат. наук, доцент

Д.А. Брацун

21.09.2018



Брацун Д.А.
ЗАВЕРЯЮ:
секретарь ПНИПУ
М.И. В.И. Макаревич
09 2018 г.

ФИО оппонента: Брацун Дмитрий Анатольевич

Почтовый адрес: Кафедра прикладной физики,
Пермский национальный исследовательский
политехнический университет
614990, Пермь, ул. Профессора Поздеева, 11

Телефон: +7 (342) 239-14-14

E-mail : DABracun@pstu.ru

Организация: ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»

Должность: заведующий кафедрой

Я, Брацун Дмитрий Анатольевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку