

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет»
Физический факультет

Кафедра теоретической физики и компьютерного моделирования

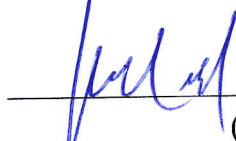
Выпускная квалификационная работа
ИНЕРЦИОННЫЕ ВОЛНЫ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ
ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СЛОЕ

Работу выполнил:
студент 851 группы
направления подготовки
44.03.05 "Педагогическое образование"
(с двумя профилями подготовки)
Профили: "Физика и Информатика"
Клепцын Станислав Юрьевич



(подпись)

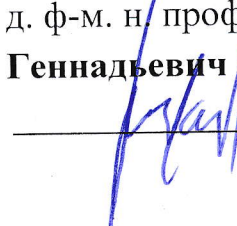
«Допущен к защите в ГАК»
Зав. кафедрой



(подпись)

«15» июня 2018 г.

Научный руководитель: (полностью)
д. ф-м. н. проф. **Козлов Виктор**
Геннадьевич



(подпись)

ПЕРМЬ

2018

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. Экспериментальное исследование влияния инерционных волн на тепловую конвекцию во вращающемся горизонтальном цилиндрическом слое.....	5
1.1 Постановка экспериментального исследования	6
1.2 Апробация экспериментального стенда.....	13
Глава 2. Демонстрационный физический эксперимент как средство мотивации учащихся.....	17
2.1 Общие вопросы демонстрационного эксперимента.....	17
2.2 Демонстрационный эксперимент «Вихри и волны во вращающейся жидкости».....	25
Заключение.....	34
Список литературы.....	35

ВВЕДЕНИЕ

Конвективные процессы имеют широкое распространение в практической деятельности человека. Немало внимания уделяется изучению тепловой конвекции в жидкостях. Наша задача состоит в том, чтобы исследовать, как влияют инерционные волны на тепловую конвекцию, а именно на тепловую конвекцию во вращающемся горизонтальном цилиндрическом слое, которой посвящено немало работ [1].

Законы физики основаны на фактах, установленных опытным путем. Причем значение одних и тех же фактов меняется, так как физика не стоит на месте, она развивается. Факты накапливаются в результате наблюдений, но только ими ограничиваться не стоит. Это только начальная ступень к познанию. После следует эксперимент, заложение понятий, допускающих качественные характеристики. Чтобы из наблюдений сделать общие выводы, выяснить, в чем же причина тех или иных явлений, нужно установить зависимость между величинами. Если такая зависимость получена, то мы обнаруживаем, открываем физический закон. Если найден физический закон, то не всегда есть необходимость в постановке опыта, достаточно провести определенные вычисления.

Из связей, которые изучаются с помощью эксперимента, следуют закономерности, на основе которых развивается общая теория явлений. Следовательно, без эксперимента не может осуществиться рациональное обучение физике; одно лишь устное обучение физике во многих случаях приводит к простому механическому заучиванию [2]. Наша задача состоит в том, чтобы рассмотреть общие вопросы демонстрационного эксперимента, а именно его роль в обучении физике, методику проведения. Также создать экспериментальную установку для демонстрации всплывания легких тел во вращающейся системе.

Целью дипломной работы является экспериментальное изучение особенностей гидродинамических процессов во вращающихся системах и, в

частности, роли силы Кориолиса. Дипломная работа состоит из двух частей. Первая часть – изучение инерционных волн, вторая – методическая разработка демонстрационного эксперимента «Вихри и волны во вращающейся жидкости», в основе которого лежит изучение тел в быстро вращающихся полостях.

Актуальность темы исследования определяется тем, что сила Кориолиса играет важную роль в образовании специфических инерционных волн, которые существуют только во вращающихся системах [3]. В то же время, сила Кориолиса играет определяющую роль при движении тел, жидкостей в быстро вращающихся системах, поэтому целью моей работы является экспериментальное изучение инерционных волн в горизонтальном цилиндрическом слое.

ГЛАВА 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНЕРЦИОННЫХ ВОЛН НА ТЕПЛОВУЮ КОНВЕКЦИЮ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЦИЛИНДРЕ

Важное место в астрофизических исследованиях, как и в исследованиях вращающихся гидродинамических систем в целом, занимает изучение распространения инерционных волн, возникающих под действием разнообразных возмущающих факторов [4]. Интересный случай представляет собой вращение полости, содержащей неоднородную по плотности жидкость, во внешнем статическом поле. Если направление поля перпендикулярно оси вращения, то в системе отсчета полости оно совершает вращение, вызывая колебания неизотермической жидкости. В этом случае частота периодического воздействия совпадает с частотой вращения. Как показано в экспериментальных [5] и теоретических [6] исследованиях результатом такого воздействия может быть возбуждение вибрационной тепловой конвекции. С другой стороны осредненные течения могут возбуждаться инерционными волнами, генерируемые колебаниями жидкости вблизи торцов полости [7].

В настоящей главе рассматривается экспериментальная установка, сконструированная для исследования влияния инерционных волн на тепловую конвекцию во вращающемся толстом горизонтальном цилиндрическом слое жидкости. Проведено испытание стенда.

1.1. Постановка экспериментального исследования

Кювета представляет собой неподвижную рубашку (рис.1), состоящей из двух торцевых стенок и трубы большого диаметра. Все детали кюветы изготавливаются из оргстекла. Торцевые стенки толщиной 30 мм, длиной и шириной 200 мм используются в качестве опор. В передней торцевой стенке (рис.1, *а*) имеется смотровое сквозное отверстие и посадочные места для установки сальника и подшипника, размер которых 120x95x10. Задняя торцевая стенка (рис.1, *б*) также имеет сквозное отверстие и посадочные места под подшипник и сальник размера 35x15x10.

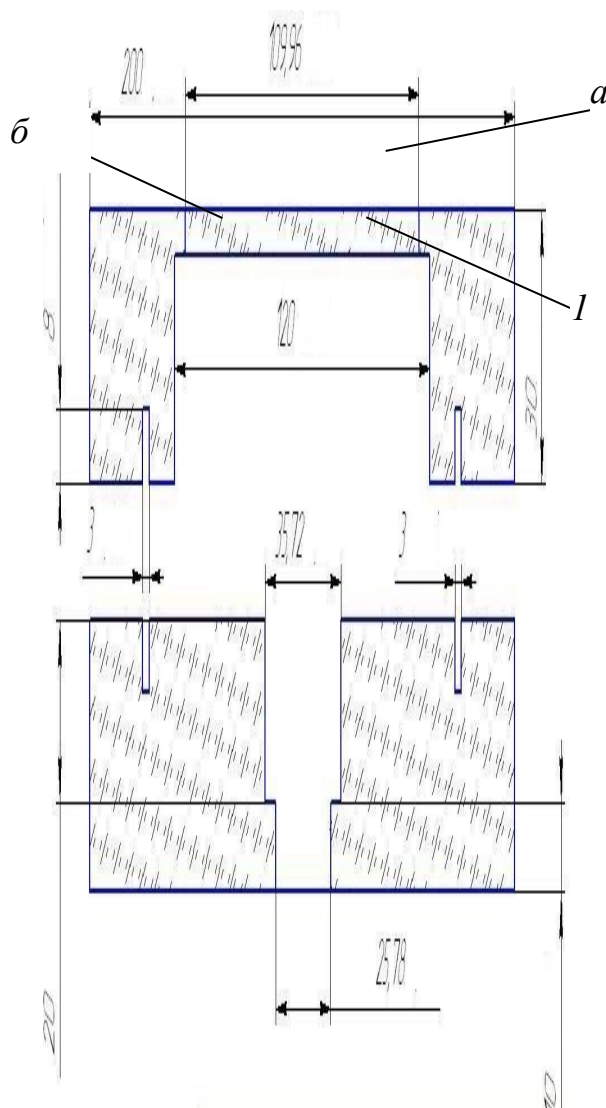


Рис.1. Схема передней (*а*) и задней (*б*) торцевых стенок рубашки кюветы

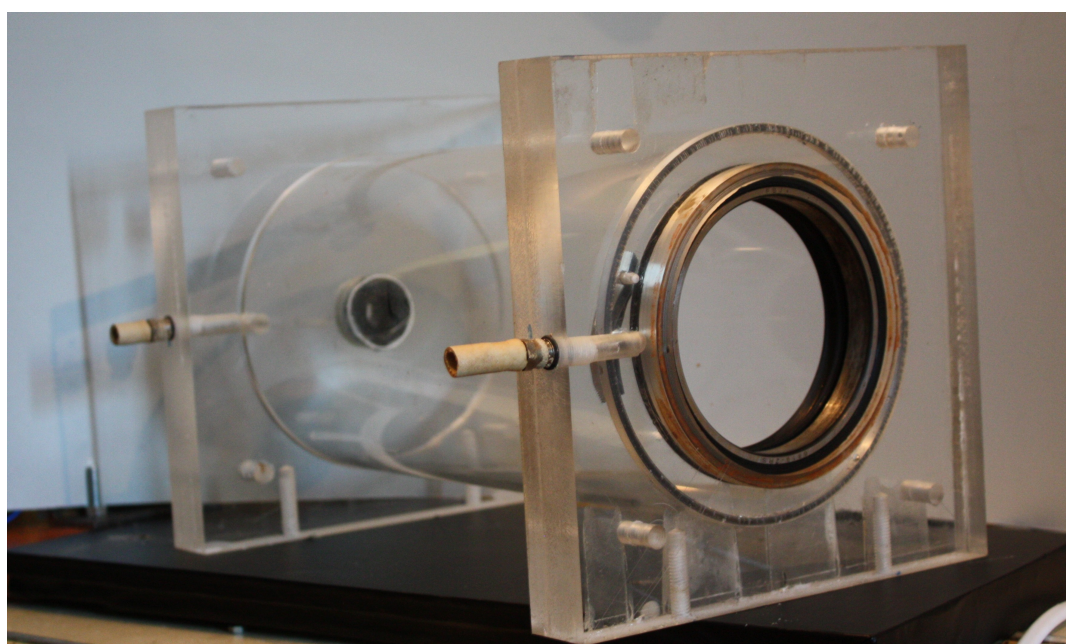
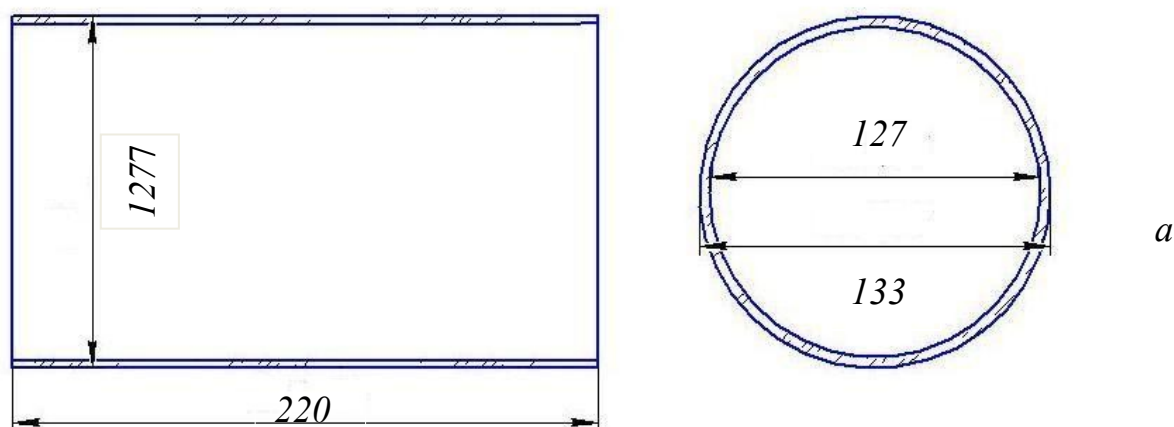


Рис.2. Схема внешней трубы (а). Фотография рубашки в сборе (б).

Между торцевыми стенками (рис.1) в пазы 1 устанавливается оргстеклянная труба. Предварительно в пазах 1 располагаются резиновые кольца. Для герметизации конструкции торцевые стенки стягиваются шпильками. Собранный конструкция жестко крепится на платформе экспериментального стенда. В каждой из торцевых стенок имеются штуцеры для подключения к термостатам. Отметим, что в данном экспериментальном стенде охлаждающая рубашка остается неподвижной. В прошлой версии экспериментальной установки рубашка совершала вращение вместе с рабочей полостью [4]. В новом подходе есть ряд преимуществ: исключается

необходимость использования гидравлического коллектора и увеличивается диапазон скорости вращения полости. На фотографии (рис.2, б) показана рубашка в сборе.

Рабочий цилиндрический слой образован оргстеклянной трубой размером 80x74x3 и алюминиевым цилиндром внешним диаметром 22 мм (рис.3). Внутри цилиндра имеется сквозное отверстие диаметром 7 мм для установки электрического нагревателя. Последний изготавливается из нихромовой проволоки диаметром 0.7 мм. Проволока плотно наматывается на тонкий неэлектропроводный сердечник. При установке нагревателя внутрь теплообменника обеспечивается хороший тепловой контакт и электроизоляция. Выводы нагревателя соединяются через электрические вращающиеся соединения со стабилизированным источником постоянного тока MASTECH NY5005E. В эксперименте мощность нагревателя изменяется в диапазоне $P = 5 - 33$ Вт при общем сопротивлении катушки из нихромовой проволоки 4 Ом. Для создания большого контраста и защиты поверхности алюминиевый цилиндр покрыт черной плёнкой толщиной 0.1 мм.

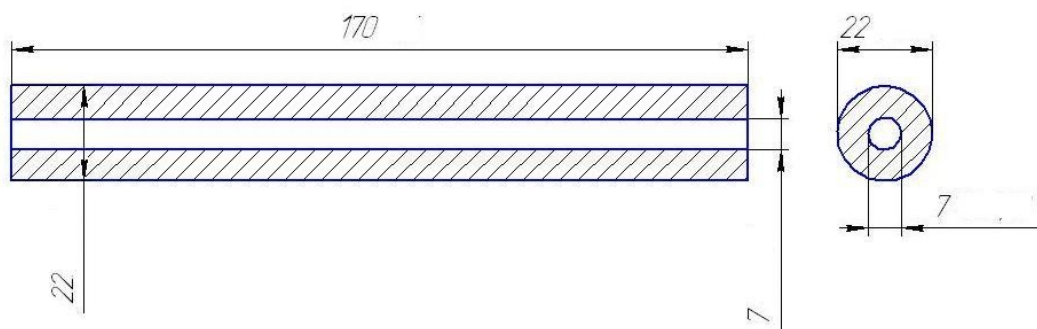


Рис.3. Схема внутреннего теплообменника

С одного торца цилиндрического слоя устанавливается смотровое стекло (рис.4, а), через которое проводится видео съемка. На образованном, таким образом, торце закрепляется бронзовая втулка для посадки подшипника и сальника большого размера.

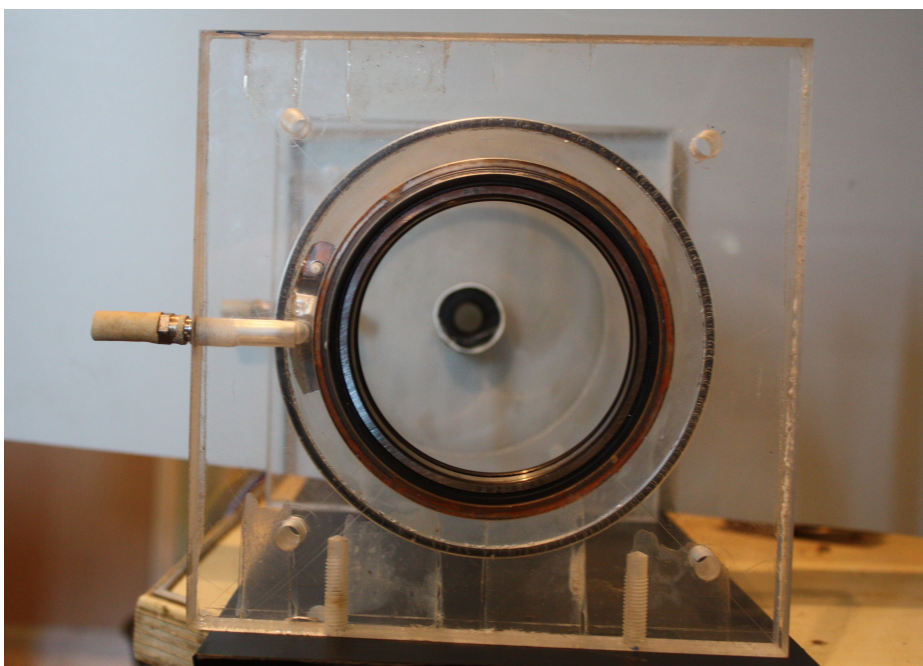
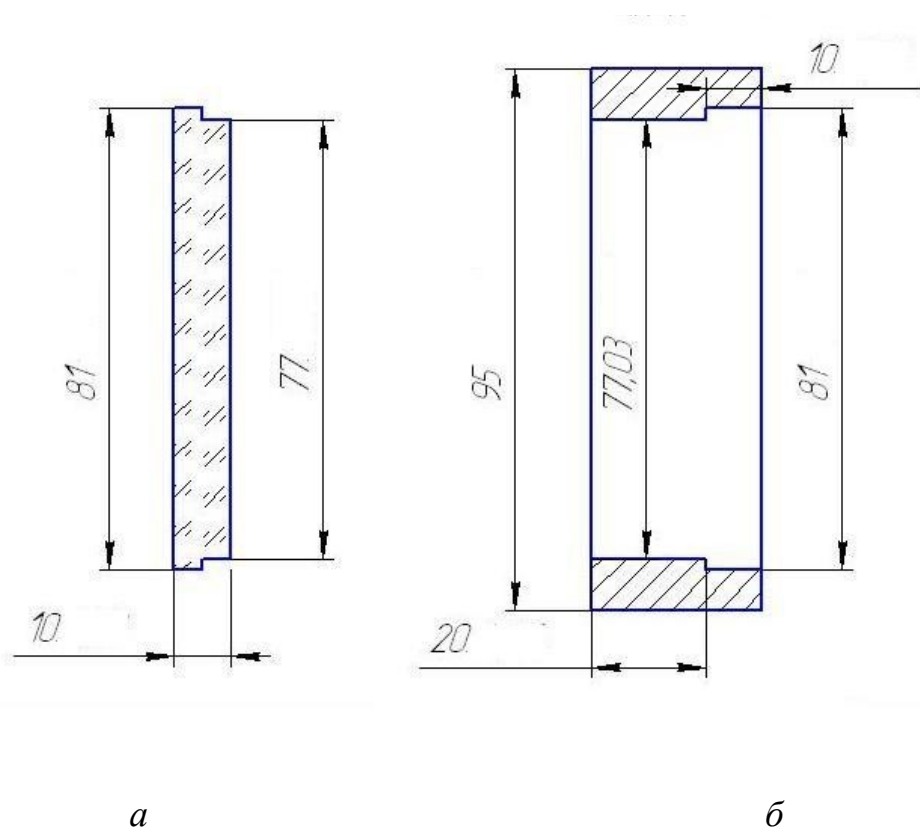


Рис.4. Схема смотрового стекла (*а*) и большой бронзовой втулки (*б*).
Фотография смотрового торца (*в*)

С другой стороны цилиндрического слоя устанавливается капролоновый фланец, состоящий из двух частей (рис.5, *а* и *б*). На первой части (рис.5, *а*) соосно закрепляются оргстеклянная труба и внутренний

алюминиевый теплообменник. При установке обеспечивается герметичность соединений. Внутри первой части фланца имеются каналы для заливки полости рабочей жидкостью. Вторая часть фланца при соединении с первой образует внутри полость, сообщающаяся с рабочей жидкостью в слое. Между частями фланца зажимается эластичная мембрана, служащая компенсатором давления в жидкости, которое может увеличиваться при нагреве или уменьшаться при резком снижении температуры жидкости, например, вследствие развития интенсивных конвективных течений.

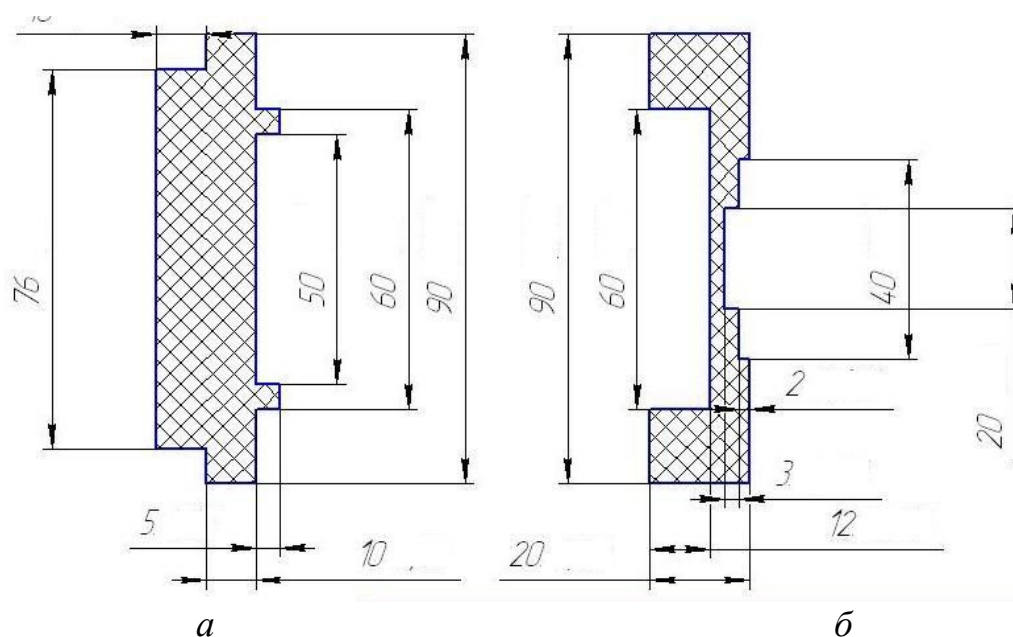


Рис.5. Схема капролонового фланца

С другой стороны капролонового фланца (рис.5, б) соосно устанавливается бронзовая втулка (рис.6) для посадки подшипника и сальника малого размера. В отличие от втулки большого размера (рис.4, б), через малую втулку передаётся вращение рабочей полости от шагового двигателя.

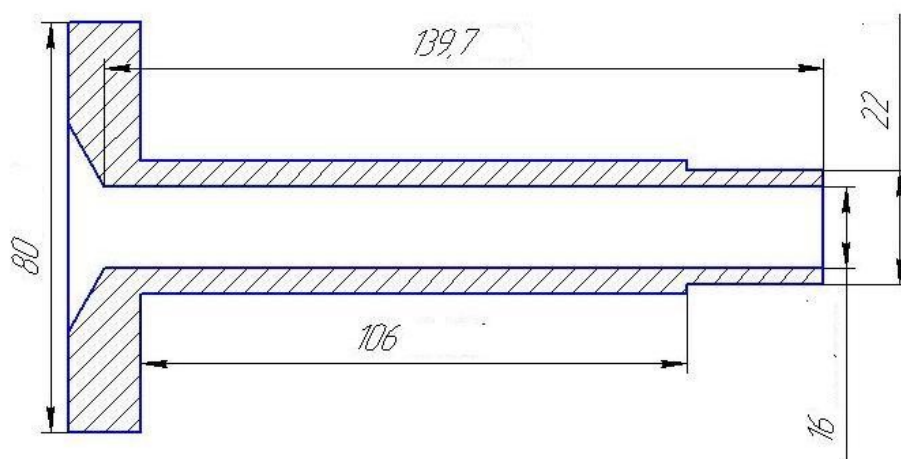
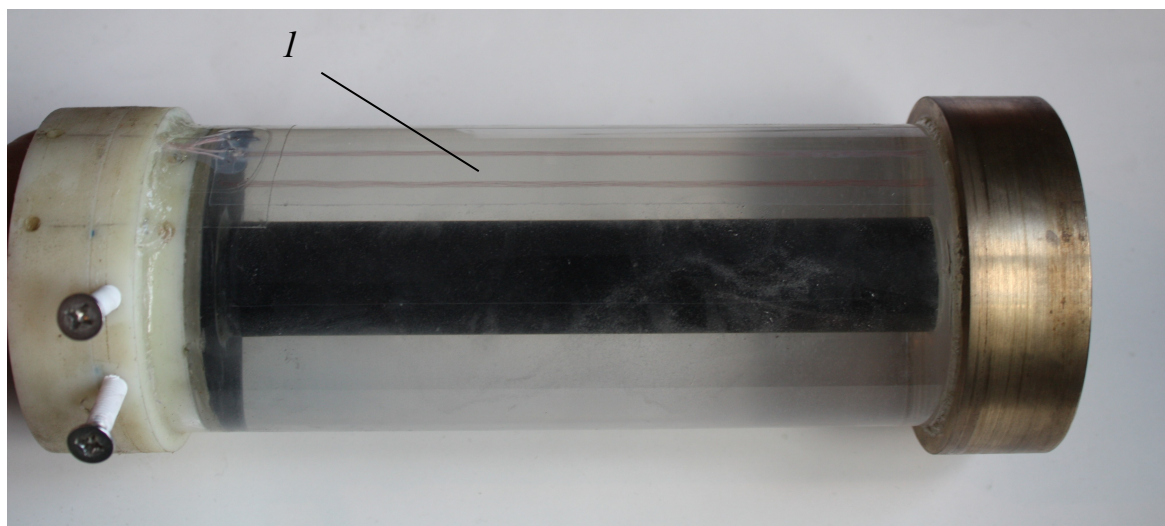


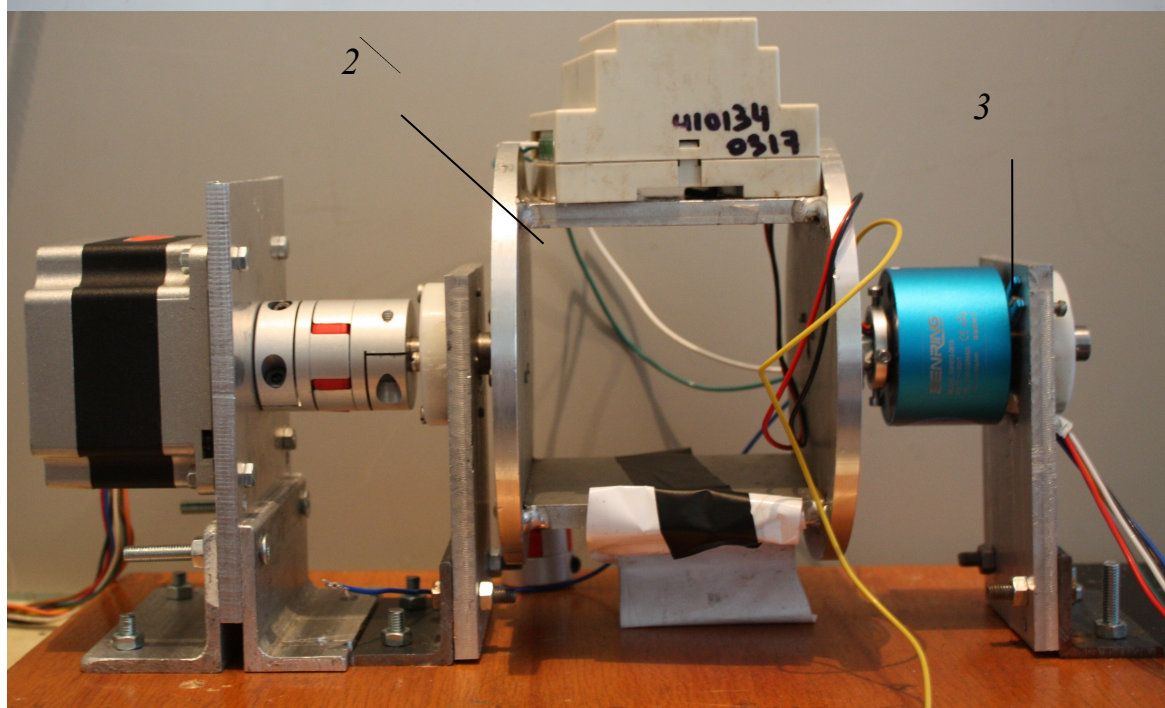
Рис.6. Схема малой бронзовой втулки.

В эксперименте контролируется температура алюминиевого цилиндра (внутренней границы слоя) T_1 , внешней границы цилиндрического слоя T_2 и охлаждающей жидкости T_3 . Измерение температуры проводится многоканальным прибором “Термодат-22К5” (погрешность измерения - 0,1 К), вращающимся вместе с кюветой. В качестве датчиков температуры используются термосопротивления, изготовленные из медного провода диаметром 0.02 мм. Датчик 1.(рис.7), измеряющий температуру T_2 и представляющий собой несколько петель проволоки, вытянутых по всей длине цилиндра, приклеивается к внутренней стенке при помощи прозрачной самоклеящейся пленки толщиной 0.1 мм и шириной 10 мм. Сопротивление датчиков составляет 90 Ом.

Вращение кюветы задается при помощи шагового двигателя типа FL86STH156, управляемого драйвером SMD-78; скорость вращения варьируется в пределах 0.01 – 2.00 об/с. Нестабильность скорости вращения не превышает 0.01 об/с. Прибор “Термодат-22К5” закрепляется в блоке 2 (рис.7). Электрическое питание прибора и подключение его к компьютеру осуществляется при помощи электрического коллектора 3. Соединения валов вращения осуществляется с помощью муфт, обеспечивающих отсутствие люфта и возможность несоосности крепления до 4 градусов.



a



б

Рис.7. Фотографии датчика на внешней границе слоя (*a*) и рабочей полости в сборе (*б*)

В качестве рабочей жидкости используются вода. Заполнение кюветы жидкостью происходит через отверстия в капролоновом фланце.

После заполнения отверстие закрывается пробкой, создающей небольшое избыточное давление в полости. При заполнении, как и в ходе экспериментов, тщательно контролируется отсутствие в жидкости твердых и

газовых включений. Теплофизические свойства рабочей жидкости определяются из справочников по средней температуре $\bar{T} = (T_1 + T_2)/2$.

1.2. Апробация экспериментального стенда

Отладка изготовленного стенда заключается в проведение тестовых экспериментов и их последующей обработке. В экспериментах проводятся тепловые измерения, определяются пороги возбуждения вибрационной конвекции. Данные эксперимента сравниваются с результатами, полученными в [8].

Методика эксперимента остается прежней [8]. Перед началом эксперимента при помощи термостата задается температура внешней границы слоя $T_3 = 18^\circ\text{C}$. Кювета приводится в быстрое вращение со скоростью $n = 2$ об/с. Источником постоянного тока задается мощность тепловыделения P на нагревателе. Ожидается время установления в полости стационарного распределения температуры. Этот процесс отслеживается по показаниям датчиков температуры и, в зависимости от мощности тепловыделения, занимает от одного до трех часов. Далее, скорость вращения пошагово понижается. На каждом шаге проводятся измерения температуры после выхода на стационарный режим конвекции. Определяются разность температур границ слоя $\Theta = T_1 - T_2$.

На рис.8 приведена запись с датчиков температуры в течении одного опыта с фиксированной мощностью тепловыделения 28 Вт. Первый этап опыта заключается в выходе быстровращающейся неоднородно нагретой жидкости в стационарное состояние, в котором температура на оси полости и на цилиндрической стенке перестает меняться. С понижением скорости вращения наблюдается несколько кризисов теплопереноса: первый наблюдается на частоте 1.1 об/с, второй – 0.4 об/с.

По результатам опыта определяются пороги возбуждения конвекции. Измеряются критические перепады температуры и соответствующие им скорости вращения.

Сравнение порогов, полученных на различных экспериментальных стендов, приведено на рис.9. Пороги представлены на плоскости управляющих параметров центробежного числа Релея Ra и вибрационного параметра R_v имеющих вид:

$$\begin{aligned} Ra &= \Omega^2 \bar{R} \beta \Theta h^3 / \nu \chi \\ R_v &= (g \beta \Theta h)^2 / 2 \nu \chi \Omega^2 \end{aligned} \quad (1.1)$$

где Ω – угловая скорость вращения полости, h – толщина слоя, $\bar{R}$ – средний радиус кривизны слоя, остальные обозначения обычные.

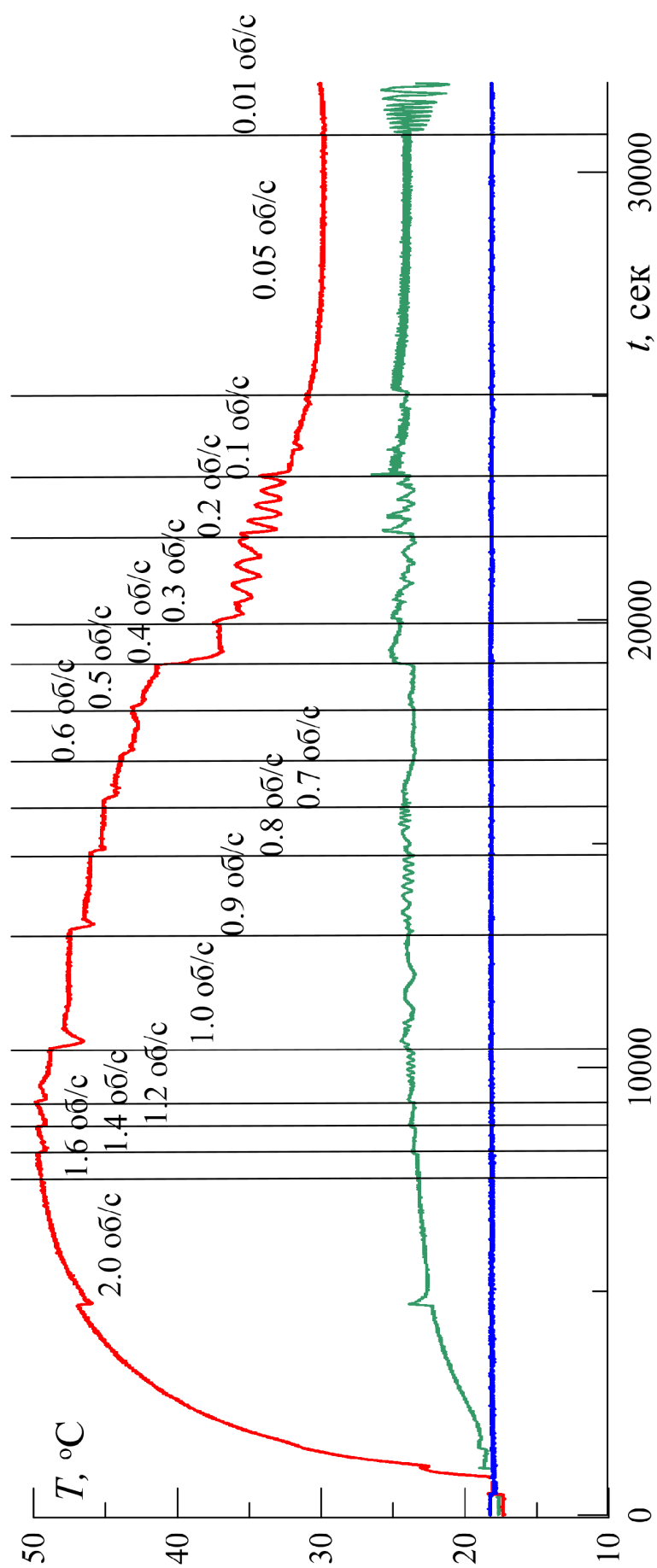


Рис.8. Запись с термодатчиков. Мощность тепловыделения во внутреннем цилиндре 28 Вт.

Пороги 1 и 3 указывают на появление в слое трехмерных тороидальных вихрей, пространственный период которых согласован с периодом инерционных волн. Пороги 2 и 4 отмечают появление двумерных валов, вытянутых вдоль оси вращения.

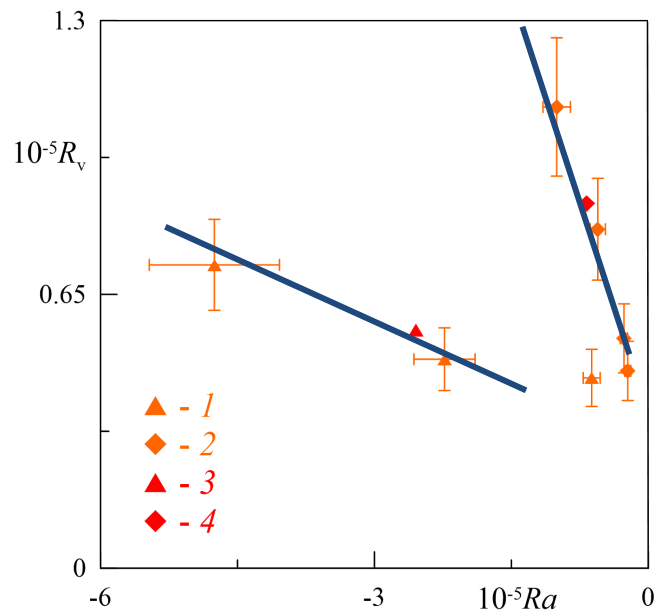


Рис.9. Пороги возбуждения конвекции на плоскости безразмерных параметров

Точки 1 и 2 (рис.9) отмечают результаты, полученные на стенде [8], 3 и 4 – на обновленном стенде. Видно, что результаты экспериментов хорошо согласуются друг с другом.

Глава 2. Демонстрационный физический эксперимент как средство мотивации учащихся

В этой главе рассматриваются методические аспекты демонстрационного эксперимента, значения эксперимента и его роль. Также в этой главе описывается экспериментальная установка для демонстрации особенностей поведения жидкости во вращающихся системах.

2.1 Общие вопросы демонстрационного эксперимента.

Я думаю, ни у кого не вызывает сомнения то, что эксперимент является основой, от которой отходят все наши представления о физических явлениях, об окружающем нас мире [9].

Физический эксперимент (демонстрационный, лабораторный, фронтальный) является также методом активации познавательной, мыслительной деятельности учащихся [10].

Трудно представить себе обучение физики без эксперимента. Без хорошо поставленных демонстрационных опытов, различных лабораторных работ невозможно обеспечить понимание и усвоение учебного материала по физике, формирование жизненно важных умений и навыков. Физический эксперимент является неким инструментом исследования нашей окружающей среды, показывает детям, что мир является материальным, изучаемым, его можно исследовать. Это побуждает детей самостоятельно искать, осмысливать причины различных физических явлений. У учащихся формируются начальные представления о мире, которые являются основой для дальнейшего обучения. Познание окружающего мира происходит за счет ощущений. Исследования психологов свидетельствуют о том, что образы действительного сильно влияют на мышление учеников в различных видах деятельности. Поэтому в развитие мышления, в формировании интеллекта учащихся значимую роль играет эксперимент [11].

Демонстрационный эксперимент нельзя заменить примерами из жизненного опыта учащихся, так как наблюдения не всегда одинаковы у разных учащихся, а поэтому они не могут являться основой для формирования нового знания. Также процессы происходят в тесной взаимосвязи с другими второстепенными явлениями. Демонстрационные опыты должны воспроизводить эти явления с минимальными погрешностями.

Велика роль демонстрационных экспериментов при повторении учебного материала. Действительно, знания учащихся в большей мере зависят от их самостоятельности, активности их мышления, их творческих способностей, умений решать проблемы.

Одним из методов познания учащимися явлений природы является решение вопросов проблемного характера. Организующим толчком в самостоятельном исследовании учебной проблемы для детей становится демонстрационный физический эксперимент, проводимый преподавателем на занятии [11].

Хороший преподаватель – преподаватель, который хорошо знает и чувствует физику. При формировании учителя важную роль играет привлечение его к научным исследованиям, желательно, на самом современном уровне. Тогда у преподавателя и появляется возможность познакомить с исследованиями самих учеников.

В механике важную роль играет вращение. Во вращающихся системах законы механики меняются – появляются дополнительные массовые силы: сила Кориолиса, центробежная сила. Исследования особенностей механики, в данном случае гидромеханики во вращающихся системах связано с чрезвычайным распространением таких систем в мире. Примером могут служить планеты, звезды, солнце, галактики, различные вращающиеся системы в быту и технике.

Значение и роль демонстрационных опытов.

Демонстрационные опыты составляют большую и очень важную часть школьного физического эксперимента. Они имеют специфические дидактические задачи и методику проведения, поэтому являются предметом специального рассмотрения в методике обучения физике. Демонстрация — это показ учителем физических явлений и связей между ними; она предназначена для одновременного восприятия учащимися всего класса. Демонстрационные опыты способствуют созданию физических представлений и формированию физических понятий; они конкретизируют, делают более понятными и убедительными рассуждения учителя при изложении нового материала, возбуждают и поддерживают у школьников интерес к предмету.

С помощью демонстрационного эксперимента преподаватель направляет мысли детей в нужное русло при изучении явлений и связей между ними. Из этого следует, что демонстрация должна быть тесно связана со словами учителя, с излагаемым материалом — это одно из важнейших условий успешного формирования физических понятий. Демонстрации приучают учащихся искать источник знаний по физике в явлениях внешнего мира, в опыте, что имеет неоценимое значение для формирования их диалектико-материалистического мировоззрения.

Демонстрационный эксперимент является неотъемлемой частью урока. Он может являться исходным элементом для объяснения (привлечения внимания учащихся, создание проблемной ситуации, выяснение темы занятий), иллюстрировать и сопровождать рассказ, беседу, объяснение и лекцию учителя, доказывать рассказанное. Демонстрационные опыты используются также для постановки экспериментальных задач — при опросе учащихся и повторении пройденного материала.

Демонстрационный эксперимент, не может быть заменен какими - то жизненными наблюдениями учеников, ведь они не всегда могут быть

правильны, так как нередко связаны с различными явлениями. При демонстрационном эксперименте акцент делается на основное явление. Благодаря этому учащиеся могут выделять в изучаемых процессах наиболее главные и важные аспекты.

Кроме важной роли демонстрационных опытов в усвоении содержания нового учебного материала, они имеют большое значение в выработке у учащихся экспериментальных умений и навыков. В процессе осмысливания демонстрационных экспериментов школьники наблюдают за физическими явлениями, фиксируют результаты измерений, учатся использовать различные приборы и т.д. Все это помогает детям в дальнейшем самостоятельно выполнять демонстрационные эксперименты.

Значимую роль играет демонстрационный эксперимент при повторении учащимися пройденного материала. Вновь проводимые опыты позволяют учащимся глубже проникнуть в сущность изученных явлений, уяснить упущенные ранее детали.

Методика проведения демонстрационных опытов

Наиболее лучшего эффекта любого демонстрационного эксперимента можно достичь только при определенной методике показа опыта. Методика демонстрационного эксперимента – это совокупность методов, приемов и средств, обеспечивающих эффективное включение демонстрационного опыта в процесс обучения. Методика демонстрационного эксперимента предполагает его дидактические возможности и последовательность действий учащихся вместе с пояснением учителя, нахождения наиболее лучшего сочетания демонстрационного опыта с другими средствами наглядности.

Демонстрационный эксперимент играет очень значимую роль в современном образовании. Как пробудить интерес учеников к физике, к самостоятельному поиску решений задач?

Задача учителя – увлечь детей, заинтересовать физикой, направить их знания в нужное русло, помочь самореализовываться в предмете, определиться с выбором способа решения задачи [12].

Методические требования к демонстрационным опытам

Основные требования к демонстрационным опытам обусловлены правилами проведения, которые преподаватель должен соблюдать:

1. Первое методическое требование – связь демонстрационного эксперимента с материалом, который учитель рассказывает, объясняет на уроке. Поэтому большинство экспериментов носит качественный характер. Демонстрационный опыт должен быть убедительным и понятным, даже если время проведения незначительно.
2. Демонстрационные эксперимент не должен занимать много времени на уроке, но и времени должно хватить на решение поставленных задач на уроке. Опыт должен завлечь, заинтересовать учащихся. При демонстрации эксперимента значимая роль принадлежит преподавателю, так как именно от его мастерства, опыта зависит успех демонстрации.
3. Соблюдение важности количества демонстраций и их взаимосвязь друг с другом. Нужно, чтобы один опыт плавно вытекал из другого, и дети могли наблюдать эту связь. (Лучше использовать одну установку для последующих экспериментов, внося лишь небольшие изменения, чтобы добиться нужного эффекта)
4. Очень важно подготовить учащихся к восприятию опыта. Дети должны быть увлечены, заинтересованы экспериментом. Демонстрация опыта без указания его цели не эффективна. Учащимся нужно поставить задачу, решение которой они смогут найти в результате демонстрации эксперимента. Обычно перед

опытом преподаватель выясняет его назначение и указывает пути достижения цели, сопровождая все объяснением, рассказом.

5. Время демонстрации должно соответствовать времени устного изложения, объяснения учителя и скорости восприятия учащимися. Также необходимо заранее подготовить все приборы и инструменты для опыта, что способствует экономии времени на уроке. Если эксперимент занимает малую часть времени урока, можно провести его повторно, что позволит учащимся лучше усвоить физическое явление, закон, который им продемонстрировали.
6. Важным элементом является место демонстрационного эксперимента на уроке, которое отводит сам учитель, в зависимости от той методики, которую он выбрал для изложения материала [12].

Особенности демонстрационного эксперимента по физике. Значение и роль демонстрационных опытов по физике.

Физика - наука экспериментальная. Поскольку между физикой-наукой и физикой-учебным предметом существует тесная связь, процесс обучения физике – идущие друг за другом сформированные физические понятия и теории, которые основываются на опыте. В ходе этого процесса находит отображение индуктивный характер установления основных физических закономерностей на базе эксперимента и дедуктивный характер вывода последствий из установленных таким образом закономерностей с использованием доступного для учеников математического аппарата.

Использование эксперимента в учебном процессе в физике позволяет:

- продемонстрировать установленные в физике законы и теории в доступном для учеников виде и сделать их смысл более понятным;
- увеличить наглядность обучения;

- ознакомить учеников с экспериментальным методом исследования физических явлений;
- показать применение физических явлений, которые изучаются, в технике, технологиях и быту;
- усилить интерес учеников к изучению физики;
- формировать политехнические и экспериментаторские навыки.

Демонстрационный эксперимент как метод обучения принадлежит к иллюстративным методам. Главным действующим звеном в демонстрационном опыте является учитель, который организует учебную работу, также проводит демонстрацию опытов. Демонстрационный эксперимент не всегда позволяет ученикам работать с приборами, что является небольшим недостатком.

С педагогической точки зрения демонстрация опытов является необходимой при решении ряда специфических задач, а именно:

- для лучшего усвоения объяснений учителя;
- для иллюстрации применения выученных физических явлений и теорий в технике, технологиях и быту;
- для возбуждения и активизации познавательного интереса к физическим явлениям и теориям;
- для проверки предположений, выдвинутых учениками в ходе обсуждения учебных проблем.

Техника демонстрирования должна удовлетворять определенным требованиям:

- метод демонстрирования должен максимально отвечать научному методу и давать достоверные результаты;
- в процессе демонстрирования нужно достичь максимальной видимости ожидаемого и существенных составных частей установки.

Для обеспечения хорошей видимости нужно придерживаться таких правил:

- ни сам учитель, ни другие предметы не должны закрывать приборы;
- отдельные приборы или их части не должны затенять друг друга;
- приборы нужно хорошо освещать;
- если явления происходят в бесцветных телах или жидкостях, то их делают видимыми одним из методов контрастирования: подсветкой или подкрашиванием;
- если предмет вращается в горизонтальной плоскости, то его метят вертикальными отметками на видимой стороне [13].

Демонстрационные опыты формируют накопленные ранее предварительные представления, которые к началу изучения физики не у всех бывают правильными. На протяжении всего курса физики эти опыты пополняют и расширяют кругозор учащихся. Они зарождают правильные начальные представления о новых физических явлениях и процессах, раскрывают закономерности, знакомят с методами исследования, показывают устройство и действие новых приборов и установок. Демонстрационный эксперимент служит источником знаний, развивает умения и навыки учащихся [14].

2.2 Демонстрационный эксперимент «вихри и волны во вращающейся жидкости»

Постановка задачи

Почти все в нашем мире вращается. Рассмотрим нашу планету. Земля не стоит на месте, а находится в непрерывном движении. Благодаря тому, что она вращается вокруг Солнца, на планете происходит смена времён года. Одновременно с вращением вокруг небесного светила, Земля совершает вращение вокруг своей собственной оси. Именно такое вращение вызывает смену дня и ночи и называется суточным.

Роль сил, которые участвуют во вращении Земли, ядра, жидкости очень велика. Остановимся именно на вращении жидкости.

Движение жидкости описывается уравнениями Навье-Стокса. Уравнения

Навье — Стокса являются одними из важнейших в гидродинамике и применяются в математическом моделировании многих природных явлений и технических задач. Названы по имени французского физика Луи Навье и британского математика Джорджа Стокса. Система состоит из двух уравнений: уравнения движения и уравнения неразрывности [15].

В векторном виде для несжимаемой жидкости они записываются следующим образом:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f} \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (2.2)$$

где ∇ — оператор Гамильтона, Δ — оператор Лапласа, t — время, ν — коэффициент кинематической вязкости, ρ — плотность, p — давление,

$\vec{v} = (v^1, \dots, v^n)$ — векторное поле скоростей, $\vec{f}$ — векторное поле массовых сил. Незвестные p и $\vec{v}$ являются функциями времени t и

координаты $x \in \Omega$, где $\Omega \subset \mathbb{R}^n$, $n = 2, 3$ — плоская или трехмерная область, в которой движется жидкость. Обычно в систему уравнений Навье-Стокса добавляют краевые и начальные условия, например

$$\vec{v}|_{\partial\Omega} = 0,$$

$$\vec{v}|_{t=0} = \vec{v}_0.$$

Если рассматривать жидкость во вращающейся системе координат, то при описании в механические уравнения движения должны быть введены дополнительные силы — центробежная и кориолисова. Соответственно этому надо добавить такие же силы (отнесенные к единичной массе жидкости) в правую сторону уравнения Эйлера (2.3). Центробежная сила может быть представлена в виде градиента $\nabla[\Omega r]^2/2$, где Ω — вектор угловой скорости вращения жидкости.

Кориолисова же сила равна $2[v\Omega]$, она появляется лишь при движении жидкости вращающейся системы координат (v — скорость в этой системе). Перенеся этот член в левую сторону уравнения Эйлера, напомним его в виде

Уравнение непрерывности сохраняет свой прежний вид (2.3) для несжимаемой жидкости к равенству $\text{div} \vec{v} = 0$ [15].

При вращении жидкости мы будем иметь дело с конечными скоростями и наша задача состоит в том, чтобы познакомить студентов и школьников с силой Кориолиса.

При движении тела относительно вращающейся системы отсчета, кроме центростремительной и центробежной сил, появляется еще одна сила, называемая силой Кориолиса или кориолисовой силой инерции (Г. Кориолис (1792 – 1843) — французский физик).

Появление кориолисовой силы можно обнаружить на следующем примере. Возьмем горизонтально расположенный диск, который может

вращаться вокруг вертикальной оси. Прочертим на диске прямую OA (Рис.2.1)

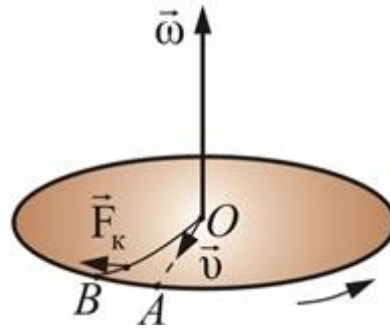


Рис. 2.1

Запустим в направлении от O к A шарик со скоростью v . Если диск не вращается, шарик должен катиться вдоль OA . Если же диск привести во вращение в направлении, в котором указывает стрелка, то шарик будет катиться по кривой OB , причем его скорость относительно диска будет быстро менять свое направление. Следовательно, по отношению к вращающейся системе отсчета шарик ведет себя так, как если бы на него действовала сила F_k , перпендикулярная направлению движения шарика.

Сила Кориолиса не является «настоящей» в смысле механики Ньютона. При рассмотрении движений относительно инерциальной системы отсчета такая сила вообще не существует. Она вводится искусственно при рассмотрении движений в системах отсчета, вращающихся относительно инерциальных, чтобы придать уравнениям движения в таких системах формально такой же вид, что и в инерциальных системах отсчета.

$$\vec{F}_k = 2m[\vec{v}, \vec{\Omega}] \quad (2.4)$$

Здесь F_k — сила Кориолиса, также являющаяся силой инерции, которая ранее нами уже упоминалась, ω — угловая скорость вращения диска.

Сила Кориолиса всегда лежит в плоскости перпендикулярной оси вращения и возникает в случаях изменения телом своего положения относительно вращающейся системе отсчета.

Для демонстрации силы Кориолиса, которая действует на движущиеся частицы жидкости, мы рассмотрим предельный случай быстрого вращения.

При этом справедлива теорема Праудмана, которая гласит, что в быстро вращающейся системе движение может быть либо двумерным (2.5), либо стационарным вдоль оси. Трехмерное движение запрещено.

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (2.6)$$

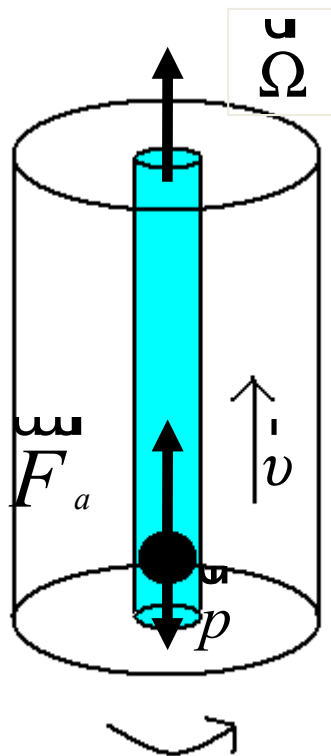


Рис. 2.2 Постановка задачи: тело, всплывающее во вращающемся вертикальном цилиндре

Для демонстрации эффекта столбиков Праудмана (любая жидкость при вращении может двигаться только в двумерной виде) рассмотрим экспериментальную установку, в которой в вертикальной вращающейся цилиндрической полости будет всплывать сферическое тело (Рис 2.2). Из

теоремы Праудмана следует, что наше сферическое тело при быстром вращении кюветы не сможет всплыть, так как трехмерное движение запрещено. Наше тело вращается вместе с жидкостью в столбике Праудмана и если бы оно начало всплывать, то только вместе со столбиком (показано на Рис 2.2 заливкой). Если тело сместиться, то вытолкнет жидкость из этого столбика, а это запрещено. Таким образом, мы ожидаем, что во вращающейся полости легкое сферическое тело в силу справедливости теоремы Праудмана, будет всплывать существенно медленнее, чем в не вращающейся системе.

Экспериментальная установка

Для моделирования эффекта столбиков Праудмана, была изготовлена экспериментальная установка.

Установка состоит из цилиндра 1 (Рис.2.3), который может вращаться в шарикоподшипниковых креплениях 2, и приводится во вращение шаговым двигателем 3 типа, расположенным строго соосно с цилиндром. На торцах цилиндра имеются две полые оси 4, которые позволяют заливать жидкость внутрь. Кювета имеет длину $l=195$ мм, внутренний радиус $R=54$ мм. Шаговый двигатель питается от генератора и может вращаться с частотой в диапазоне $n= 0-30$ об/с. Полость заполняется жидкостью, в качестве которой используется кипяченая вода плотностью $\rho_{ж}=1$ г/см³. В полости находится легкий шарик диаметром $d=25.2$ мм, плотностью $\rho_m=0.03$ г/см³ и $m=2.2$ г.

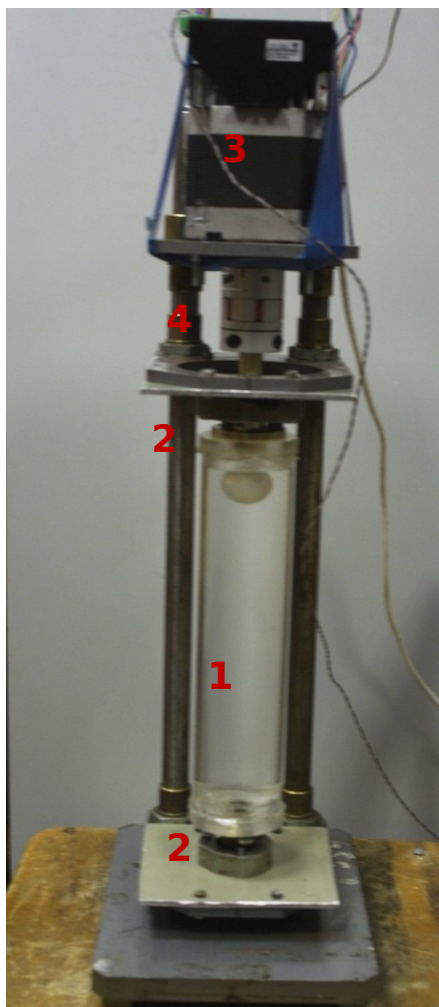


Рис. 2.3 Фотография экспериментальной установки

Методика и результат

Заполненную жидкостью кювету переворачиваем для того, чтобы шарик опустился в нижнюю ее часть. Увеличиваем частоту вращения до тех пор, пока шарик не центрифугирует, после чего кювета переводится в вертикальное положение, и изучается всплытие тела. Скорость всплытия шарика оказывается в сотни раз меньше скорости всплытия шарика в отсутствие вращения кюветы (Рис 2.4). Это подтверждает идею о существовании столбика Праудмана и запрете на трехмерное движение. Таким образом, мы продемонстрировали неожиданное действие силы Кориолиса.



Рис. 2.4 Фотография всплытия шарика при вращении кюветы

В экспериментах, проведенных при различной частоте вращения $n=20\div 27.5$ об/с, время всплытия шарика составляет t (продемонстрировано в Таблице 1).

Было обнаружено, что тело, вращаемое вместе с полостью, имеет разные скорости всплытия, которые мы можем вычислить через время поднятия шарика.

ω , об/с	t , с	v , м/с
20,00	73	0,0027
22,50	97	0,0020
25,00	103	0,0019
27,50	114	0,0017

Таблица 1: Скорость всплытия шарика при различной частоте вращения кюветы

Если рассмотреть график, то можно пронаблюдать зависимость скорости всплытия шарика от частоты вращения цилиндра.

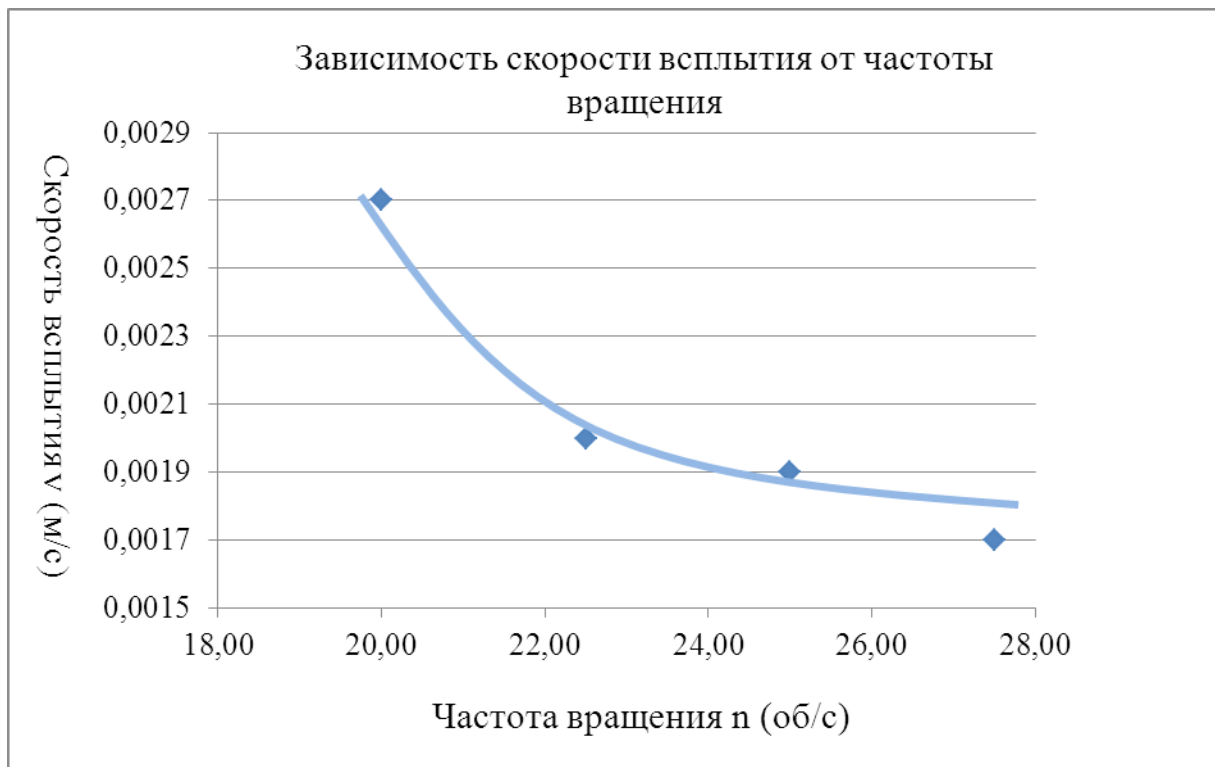


Рис. 2.6 График зависимости скорости всплытия шарика от частоты вращения жидкости

Скорость всплытия шарика v можно оценить, используя формулу Стокса, которая также справедлива при ламинарном движении жидкости, при этом сила Архимеда уравновешивается силой вязкого трения (2.6).

$$v = \frac{gd^2(\rho_{ж} - \rho_m)}{18\eta} \quad (1.6)$$

где $\rho_{ж}$ - плотность жидкости, ρ_m - плотность тела, d - диаметр тела, η - динамическая вязкость жидкости.

Из формулы (1.6) следует значение скорости, с которой всплывает шарик при вращении жидкости.

$$v \approx 2(m / c)$$

Таким образом, приходим к выводу, что скорость всплытия тела при вращении на несколько порядков меньше скорости тела в отсутствие вращательного движения, этим подтверждается теорема Праудмана.

Наша задача - удивить школьника. Продемонстрировать эксперимент в отсутствие вращения кюветы, показав, как быстро всплывет шарик со дна цилиндра. Повторить опыт, показав, как всплывает тело уже во вращающейся системе, при этом скорость всплытия шарика будет на несколько порядков меньше скорости всплытия в отсутствие вращения. Создается впечатление, что на тело действует какая-то дополнительная сила, препятствующая его движению. На самом деле в основе лежит сила Кориолиса, что действительно является удивительным и неожиданным.

Заключение

Разработан и изготовлен экспериментальный стенд для изучения инерционных волн, обусловленных своим существованием силой Кориолиса, во вращающемся горизонтальном цилиндрическом слое жидкости.

Проведена апробация стенда. Показано, что с помощью данной установки имеется возможность экспериментально исследовать влияния инерционных волн на тепловую конвекцию во вращающемся горизонтальном цилиндре. Это важно для астрофизических исследований, и для исследований вращающихся гидродинамических систем в целом.

Разработана и изготовлена экспериментальная установка для демонстрации учащимся силы Кориолиса и центробежной силы инерции во вращающейся жидкости. С помощью установки на практике продемонстрирована теорема Праудмана, которая объясняется неожиданным появлением силы Кориолиса. Благодаря этому, учащиеся сами могут оценить влияние на гидродинамические явления при вращении.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Greenspan H.P.* The Theory of Rotating Fluids. Cambridge University Press. New York, 1968. 328 p.
2. *Силеверстов А.А.* «Физический эксперимент и его роль в обучении физике» Социальная сеть работников образования. Электронный ресурс
[<https://nsportal.ru/shkola/fizika/library/2013/04/06/demonstratsionnye-opyty-na-urokakh-fiziki>] 2013.
3. *Вяткин А.А. Козлов В.Г. Сабиров Р.Р.* Конвекция тепловыделяющей жидкости во вращающемся горизонтальном цилиндре , Изв. РАН. МЖГ, Пермь, 2011 С 1-2.
4. *L.R.M. Maas.* On the amphidromic structure of inertial waves in a rectangular parallelepiped // Fluid Dynamics Research. 2003. Vol. 33. P. 373–401.
5. *Вяткин А.А., Иванова А.А., Козлов В.Г.* Конвективная устойчивость неизотермической жидкости во вращающемся горизонтальном коаксиальном зазоре // Изв. РАН. МЖГ. 2010. № 1. С. 12–21.
6. *Козлов В.Г.* Вибрационная конвекция во вращающихся полостях // Изв. РАН. МЖГ. 2004. № 1. С. 5 –14.
7. *Kozlov V.G., Ivanova A.A., Vjatkin A.A., Sabirov R.R.* Vibrational convection of heat-generating fluid in a rotating horizontal cylinder. The relative length of the cavity role // Acta Astronautica. 2015. V. 112. P. 48–55.
8. *Вяткин А.А., Козлов В.Г., Сираев Р.Р.* О конвективной устойчивости жидкости во вращающемся горизонтальном цилиндрическом слое // Изв. РАН. МЖГ, 2017. № 4. С. 73–84.

9. Барков Л.М. Роль эксперимента в современной физике Институт ядерной физики СО РАН. Электронный ресурс [<http://velt.kharkov.ukrtel.net/dugin/index.htm>].
10. Монгуш Л. М. Роль эксперимента на уроках физики. Электронный ресурс [<https://infourok.ru/rol-eksperimenta-na-urokah-fiziki-1302880.html>].
11. Толчев С.В. Методическая разработка «Роль физического эксперимента в обучении». Электронный ресурс [<https://e-koncept.ru/2016/46310.htm>] 2012г.
12. Рябова В.З. «Демонстрационные опыты на уроках физики» Социальная сеть работников образования. Электронный ресурс [<https://nsportal.ru/shkola/fizika/library/2013/04/06/demonstratsionnye-opyty-na-urokakh-fiziki>] 2013.
13. Бугаев А.И. Методика преподавания физики. Теоретические основы. - М.: Просвещение, 1981.- 288с.
14. Sventitsky G.D. *Physical* experiment as a means of enhancing the cognitive interest in physics lessons // *Physical and Mathematical Education : scientific journal*. – 2016. – Issue 3(9). – P. 89-93.
15. Ландау Л.Д. Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Теоретическая физика: т.VI (3-е изд., перераб.-М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1986.-736 с.