

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

Выпускная квалификационная работа
Исследование теплопереноса и структуры конвекции 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"
Киселев Иван Александрович



(подпись)

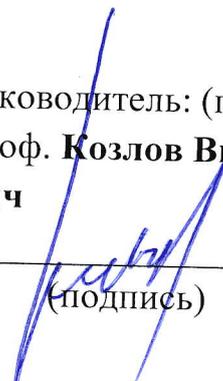
«Допущен к защите в ГАК»
Зав. кафедрой



(подпись)

«13» марта 2018 г.

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



(подпись)

ПЕРМЬ

2018

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Глава 1. Экспериментальное исследование тепловой конвекции во вращающемся горизонтальном толстом цилиндрическом слое жидкости	6
1. Постановка экспериментального исследования.....	6
1	
1. Результаты эксперимента.....	10
2	
1. Анализ результатов.....	16
3	
Глава 2. Интерактивный демонстрационный эксперимент	19
2. Обзор интерактивных демонстрационных экспонатов по физике	19
1	
2. Интерактивный демонстрационный эксперимент "Движение жидкости во вращающейся системе, форма поверхности жидкости в поле силы тяжести".....	23
2	
Заключение	33
Список литературы	34

Введение

Год за годом все четче прослеживается рост количества учащихся, которые выбирают ЕГЭ по физике. Исходя из статистических данных, в 2015 году физику сдавали 22% учащихся по всей России. В 2017 году этот процент увеличился до 38%, что означает что физику, в качестве итогового экзамена, выбрал каждый третий учащийся в нашей стране. С чем же связан рост? Рост связан с тем, что в настоящее время выше ценятся специальности технических направленностей, нежели гуманитарных. Так же заинтересованность в физике можно пронаблюдать и в росте количества всевозможных научных съездов для школьников. В том числе и наш университет проводит данные мероприятия. В данный момент есть множество возможностей и инструментов проводить проектную и исследовательскую деятельность среди учащихся. Разрабатываются программы обучения, закупается необходимая материальная база, педагоги повышают свою квалификацию, для того чтобы привить учащимся стремление познавать что-то новое, делать открытия, наблюдать абсолютно новые явления. Все это непосредственно сказывается на заинтересованности учащихся в физическом эксперименте.

Существует множество экспериментов связанных с вращательным движением. При вращательном движении появляются новые силы, которые так или иначе сказываются при формировании того или иного явления. В дальнейшем мы рассмотрим, как дополнительные силы сказываются на форме Земли. При исследовании вращательного движения, можно пронаблюдать явления теплопереноса и формирование структур конвекции, формирование структур на поверхности жидкости на границе двух сред (воздух — вода).

Исследование неизотермических гидродинамических систем при совместном действии вибраций и вращения интересно с позиции как фундаментальных исследований [4], так и прикладных, например, при разработке способов вибрационного управления неоднородными по плотности

системами [5]. Последнее имеет непосредственное отношение к решению актуальных технических задач сегрегации, фильтрации сред и т.д.

Теоретическое описание динамики неизотермической жидкости при одновременном воздействии вибраций и вращения Ω_{vib} приведено в [4]. Ограничимся рассмотрением случая совпадения частоты Ω_{vib} вибрационного воздействия и частоты вращения Ω_{rot} . В эксперименте эта ситуация реализуется горизонтальным расположением оси вращения полости, содержащей неизотермическую жидкость (непосредственные вибрации полости отсутствуют). Внешнее стационарное поле силы тяжести совершает вращение в системе отсчета полости в направлении противоположном вращению полости в лабораторной системе отсчета. В этом случае проявляются различные вибрационные эффекты: вибрационная тепловая конвекция [6-10], дрейф конвективных структур относительно полости [6,7] и возбуждение инерционных волн [8-11].

Целью дипломной работы является изучение влияния инерционных волн, пороги и структуры термовибрационной конвекции в толстом горизонтальном коаксиальном зазоре при вращении.

В рамках дипломной работы решаются две задачи:

1. *Исследовательская*: изучение влияния инерционных волн на тепловую конвекцию, пороги и структуры термовибрационной конвекции в толстом горизонтальном цилиндрическом слое.
2. *Методическая*: демонстрация особенности поведения жидкости во вращающихся системах, а именно изучение и демонстрацию формы границы разделы жидкостей или жидкость – газ во вращающемся цилиндре в поле силы тяжести.

Новизна и актуальность определяется тем, что в настоящее время работ по изучению тепловой конвекции при действии различных осложняющих факторов очень велико. К важнейшим факторам воздействия относятся вращение [1,2] и вибрации [3].

Применение и практическая значимость. Разработанная интерактивная демонстрационная установка может использоваться в образовательном процессе для увлечения детей физикой и знакомством с разделом физики «вибрационная гидродинамика». Позволяет наблюдать формы поверхности на границе двух сред.

Глава 1. Экспериментальное исследование тепловой конвекции во вращающемся горизонтальном толстом цилиндрическом слое жидкости

1.1 Постановка экспериментального исследования

Экспериментальная установка и методика изучения тепловой конвекции в горизонтальном тонком цилиндрическом слое при вращении подробно рассмотрены в [7]. Увеличение толщины слоя достигается заменой внутреннего алюминиевого теплообменника.

Внутренняя граница коаксиального зазора образована алюминиевым цилиндром 1 радиусом $R_1 = 11$ мм. На оси теплообменника имеется сквозное отверстие диаметром 6 мм для установки нагревателя 2. 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 уменьшения тепловых потерь через торцевые стенки с боков устанавливаются дополнительные вставки 3 из фторопласта.

Снаружи цилиндрический слой ограничен плексигласовой трубой 4 внутренним радиусом $R_2 = 37$ мм и толщиной 3 мм. Внешняя граница слоя охлаждается жидкостью, циркулирующей в коаксиальном зазоре 5 ограниченном плексигласовыми трубами 4 и 6. Охлаждающая жидкость сообщается с циркуляционным термостатом LIOP LT-416a через систему вращающихся гидравлических соединений. Конструкции электрических и гидравлических вращающихся соединений описаны в [7].

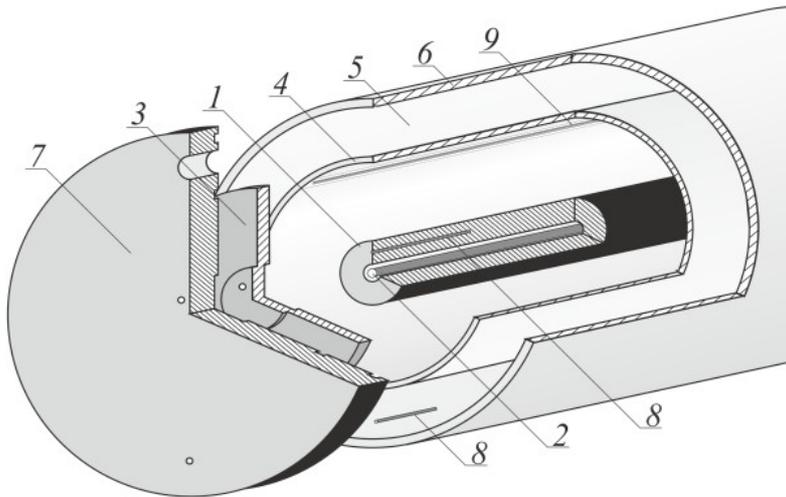


Рис.1. Схема кюветы

Образованный цилиндрический слой имеет следующие параметры: средний радиус $\bar{R} = 24$ мм, толщина $h = 26$ мм и длина $l = 220$ мм. Коаксиальность цилиндров 1, 4 и 6 задается торцевыми алюминиевыми фланцами 7.

В эксперименте контролируется температура алюминиевого цилиндра (внутренней границы слоя) T_1 , внешней границы цилиндрического слоя T_2 и охлаждающей жидкости T_3 в полости 5. Измерение температуры проводится многоканальным прибором “Термодат-22К5” (погрешность измерения - 0,1 К), вращающимся вместе с кюветой. В качестве датчиков температуры используются термосопротивления 8 и 9 (рис.1), изготовленные из медного провода диаметром 0.02 мм. Датчик 9, 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.

В качестве рабочей жидкости используются вода и водный раствор глицерина с массовой долей глицерина $C = 50\%$. Заполнение кюветы жидкостью происходит через штуцеры в одном из фланцев. После заполнения на штуцер надевается пластиковый сильфон, создающий 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 $\bar{T} = (T_1 + T_2)/2$ на каждом шаге эксперимента.

Перед началом эксперимента при помощи термостата задается температура внешней границы слоя T_3 . Источником постоянного тока задается мощность тепловыделения P на нагревателе. Кювета приводится в относительно быстрое вращение. 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 $\Theta = T_1 - T_2$ и перепад температуры $\Delta T = T_2 - T_3$ на стенке плексигласовой трубы. Разности температур в обозначениях Θ_o и ΔT_o соответствуют случаю быстрого вращения, когда конвекция в полости отсутствует.

Для визуализации течения в рабочую жидкость добавляется алюминиевая пудра (0.03 % от массы жидкости соответственно). Для создания большого

контраста и защиты поверхности алюминиевый цилиндр I (рис.1) покрыт черной плёнкой толщиной 0.1 мм.

1.2 Результаты эксперимента

Быстрое вращение цилиндрического слоя с более нагретой внутренней границей приводит к механическому равновесию жидкости. Стационарное осесимметричное распределение температуры реализуется под действием центробежной силы инерции. Разность температуры границ слоя Θ не зависит от скорости вращения n (рис.2, область I).

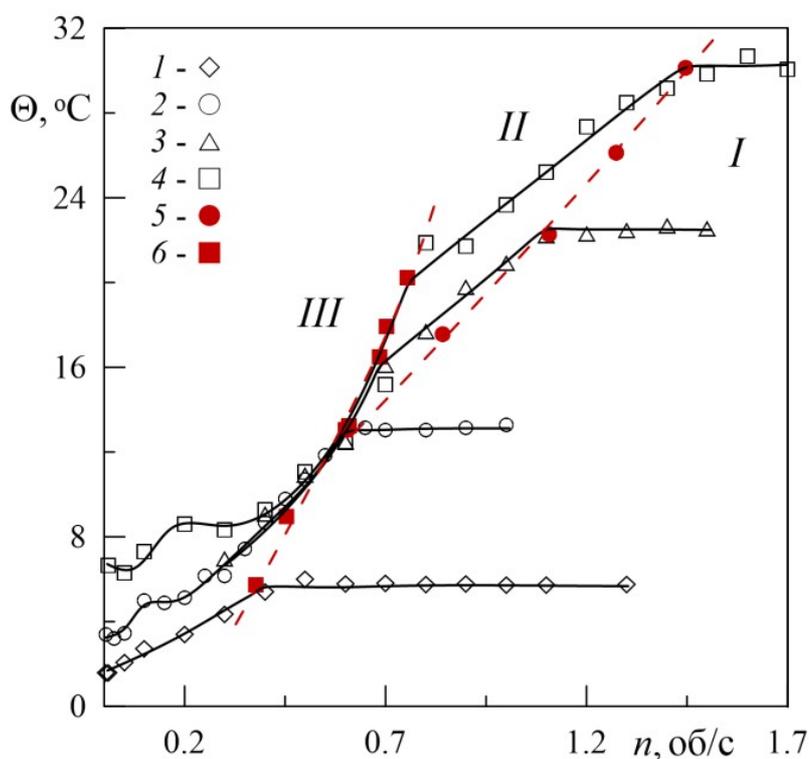


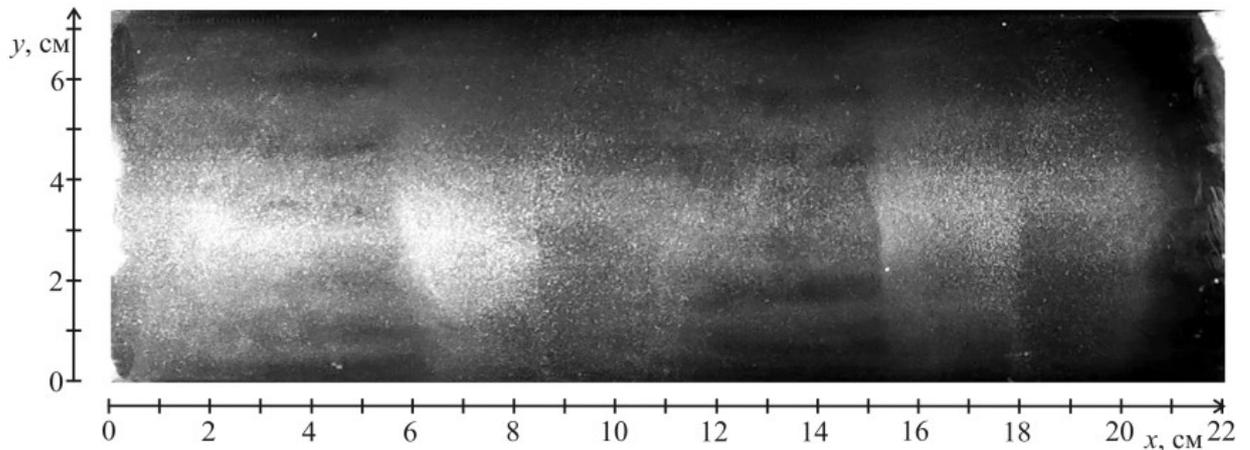
Рис.2. Зависимость разности температур границ слоя Θ от скорости вращения n ; вода, $T_3 - T_1 = 5.9$ (1), 13.3 (2), 22.6 (3) и 30.1 °C (4); 5 – пороговые кривые возникновения тороидальных вихрей; 6 – пороговые кривые возникновения продольных валов.

С понижением скорости вращения n в слое жидкости пороговым образом развивается конвекция. Появление конвективных течений сопровождается кризисом теплопереноса (рис.2, левая граница области I). Температура внутренней границы слоя снижается. Наблюдается несколько режимов конвекции. Кольца на алюминиевой пудре, распределенной по поверхности

внешней границы слоя (рис.3, а), указывают на появление системы трехмерных тороидальных вихрей. Вдоль оси полости кольца располагаются не симметрично. На фоне поперечных вихрей возникают двумерные валы, вытянутые вдоль оси вращения (рис. 3, б).



а



б

Рис.3. Фотографии конвективных структур; а – $T_3 - T_1 = 29.7 \text{ }^\circ\text{C}$, $n = 1.2 \text{ об/с}$; б – $T_3 - T_1 = 12.5 \text{ }^\circ\text{C}$, $n = 0.6 \text{ об/с}$; вода

В случае малых значений разности температур границ слоя (рис.2, точки 1 и 2) в пороге (граница областей I и III) двумерные и трехмерные конвективные течения возникают совместно. При больших Θ вначале развиваются тороидальные вихри (область II), и, с понижением скорости вращения, пороговым образом появляются продольные валы (граница областей

II и *III*). Последние в отличие от случая тонкого слоя не регулярны как вдоль азимута слоя, так и вдоль оси, и не вызывают колебания температуры, регистрируемые датчиками. С повышением вязкости жидкости структура конвекции и порядок смены режимов конвекции не изменяется.

Природа двумерных и трехмерных конвективных течений различная. Можно предположить, что азимутальные вихри связаны с распространением в жидкости инерционных волн. В работе [8] показано, что инерционные волны оказывают значительное влияние на порог возбуждения осредненной конвекции жидкости с внутренними источниками тепла в горизонтальном вращающемся цилиндре. В полости наблюдается распространение двух инерционных волн вдоль прямых конусов, одна – от левого торца, другая – от правого.

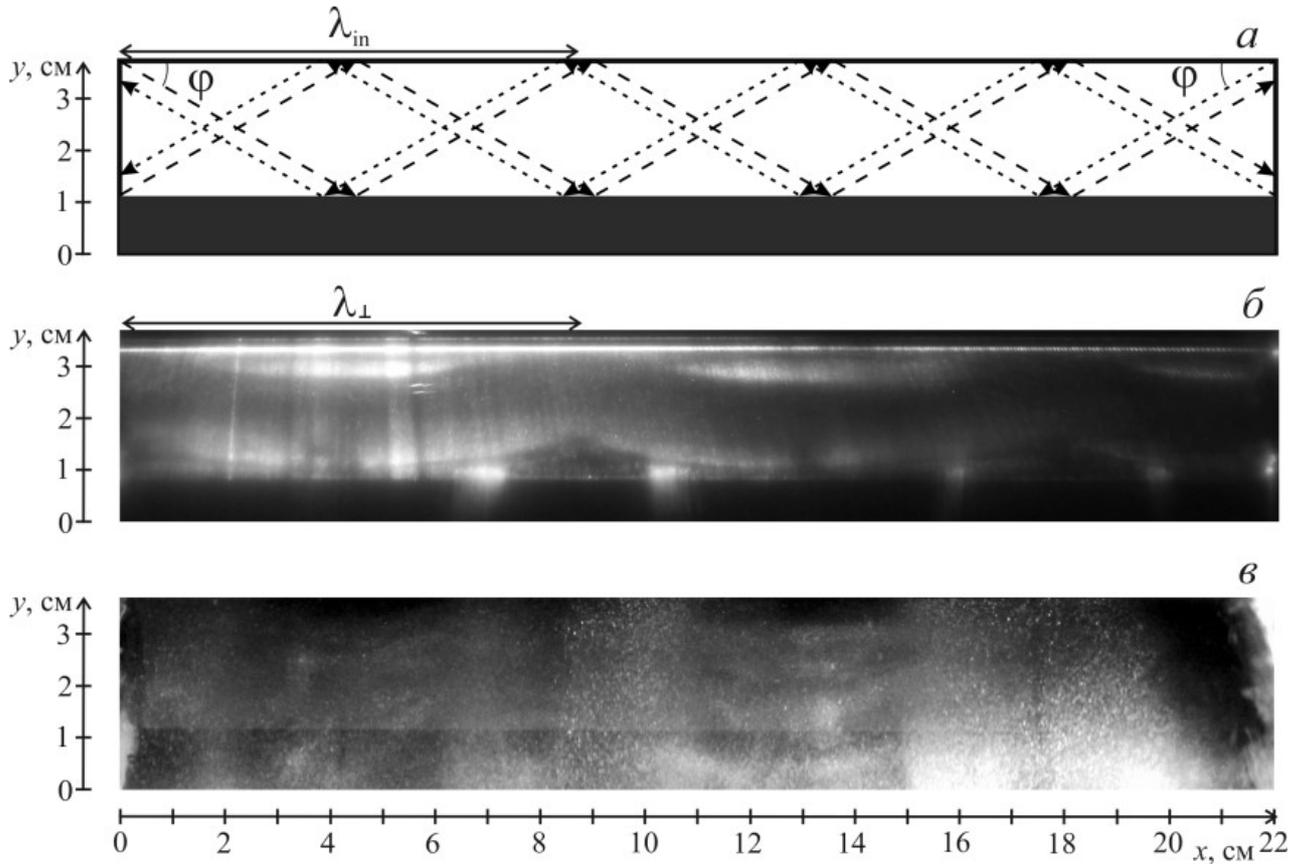


Рис.4. Схема распространения инерционных волн (а) и фотографии конвективных структур; $T_3 - T_1 = 30.2$ °С, $n = 1.2$ (б) и 0.7 об/с (в), водоглицериновый раствор

На рис.4а показана схема распространения инерционных волн в диаметральном разрезе верхней половины цилиндрического слоя. Угол φ между направлением распространения волны и осью вращения рассчитывается из условия $\operatorname{tg} \varphi = (4/N^2 - 1)^{-1/2}$ [12], где $N = \Omega_{osc} / \Omega_r$ – безразмерная частота осцилляций жидкости (Ω_{osc} – частота колебаний жидкости, $\Omega_r = 2\pi n$ – угловая скорость вращения полости). На длину полости укладывается 2.5 длины волны. В рассматриваемом случае колебания жидкости в системе отсчета полости происходят с частотой вращения, т.е. $N = 1$. С учетом [12], пространственный

период инерционной волны λ_{in} составляет $h(2/\sqrt{3})$. Характеристические поверхности волн, идущих от обоих торцов, практически совпадают.

Распространение инерционных волн приводит к неоднородности азимутальной скорости движения жидкости вдоль оси полости. В результате этого в полости формируется система тороидальных вихрей (рис.4б). Положение конвективных структур согласовано со схемой распространения инерционных волн (рис.4а). Длина волны поперечных оси вращения конвективных структур λ_{\perp} совпадает с пространственным периодом инерционной волны λ_{in} . Вдоль оси полости наблюдается асимметрия в расположении вихрей.

Возбуждение продольных конвективных течений (рис.4в) связано с действием термовибрационного механизма. В основе последнего лежат вызываемые внешним полем «приливные» колебания неизотермической жидкости в системе отсчета полости [4,6]. Продольные течения наблюдаются не на всей длине полости.

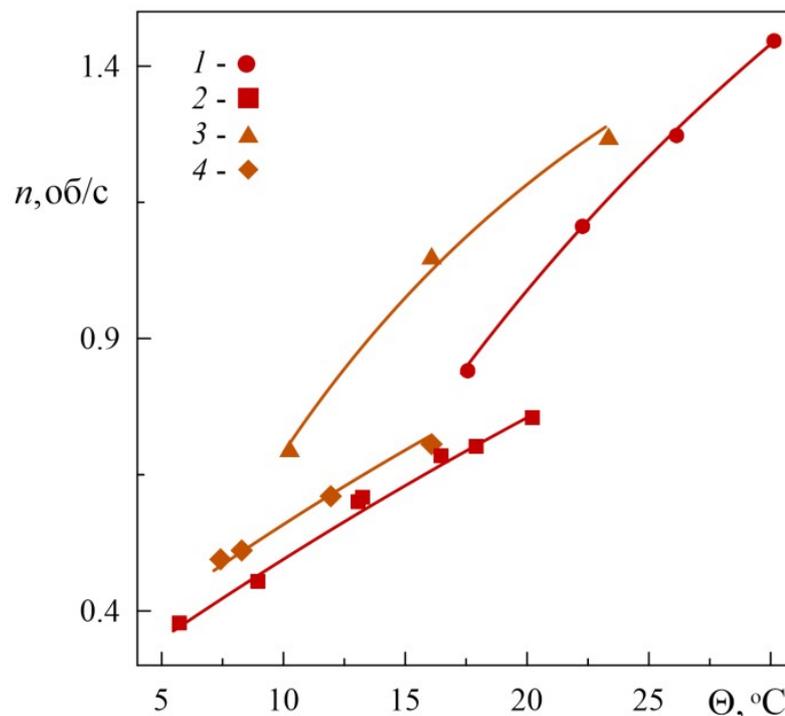


Рис.5. Границы смены режимов; 1 и 2 – вода, 3 и 4 – водоглицериновый раствор

На рис.5 показана карта режимов конвекции на размерной плоскости n, Θ . Точки 1 и 3 соответствуют переходу от состояния квазиравновесия к азимутальным вихрям. При фиксированном значении разности температур Θ границ слоя срыв устойчивости квазиравновесия в вязкой жидкости происходит при значительно больших n . Повышение критического значения n с увеличением Θ связано с возрастающей интенсивностью инерционных волн. Точками 2 и 4 показаны границы перехода к продольным валам существующих совместно со сложной системой тороидальных структур.

1.3. Анализ результатов

В работах [6,7] выполнено экспериментальное исследование осредненной конвекции в горизонтальном тонком цилиндрическом слое, равномерно вращающемся вокруг собственной оси. В [10] методами теории гидродинамической устойчивости изучены условия механического квазиравновесия определены с учетом термовибрационного и центробежного механизмов тепловой конвекции границы его устойчивости и формы критических движений. Показано, что в случае более высокой температуры внутренней границы слоя (центробежная сила инерции при этом играет стабилизирующую роль), конвекция проявляется в пороговом развитии вытянутых вдоль оси вращения валов и определяется термовибрационным механизмом. К определяющим параметрам относится центробежное число Релея $Ra = \Omega^2 \bar{R} \beta \Theta h^3 / \nu \chi$ и вибрационный параметр $R_v = (g \beta \Theta h)^2 / 2 \nu \chi \Omega^2$ (здесь Ω – угловая скорость вращения полости, h – толщина слоя, \bar{R} – средний радиус кривизны слоя, остальные обозначения обычные). Найденные экспериментально пороги возбуждения двумерных конвективных структур хорошо согласуются с теоретическими.

В толстом цилиндрическом слое действие термовибрационного механизма осложняется распространением инерционных волн. Последние возбуждают конвективные течения, нарушающие температурные поля. На рис.6 показаны границы смены режимов конвекции на плоскости управляющих параметров Ra, R_v . На рис.6б указан масштаб отмеченный областью I на рис.6а. Точками 1 и 3 указана граница устойчивости квазиравновесия. Кризис теплопереноса связан с появлением системы тороидальных вихрей, возбуждаемых инерционными волнами. Пороги, полученные на жидкостях различной вязкости, не согласуются на плоскости выбранных параметров. Трехмерные конвективные структуры управляются не термовибрационным механизмом.

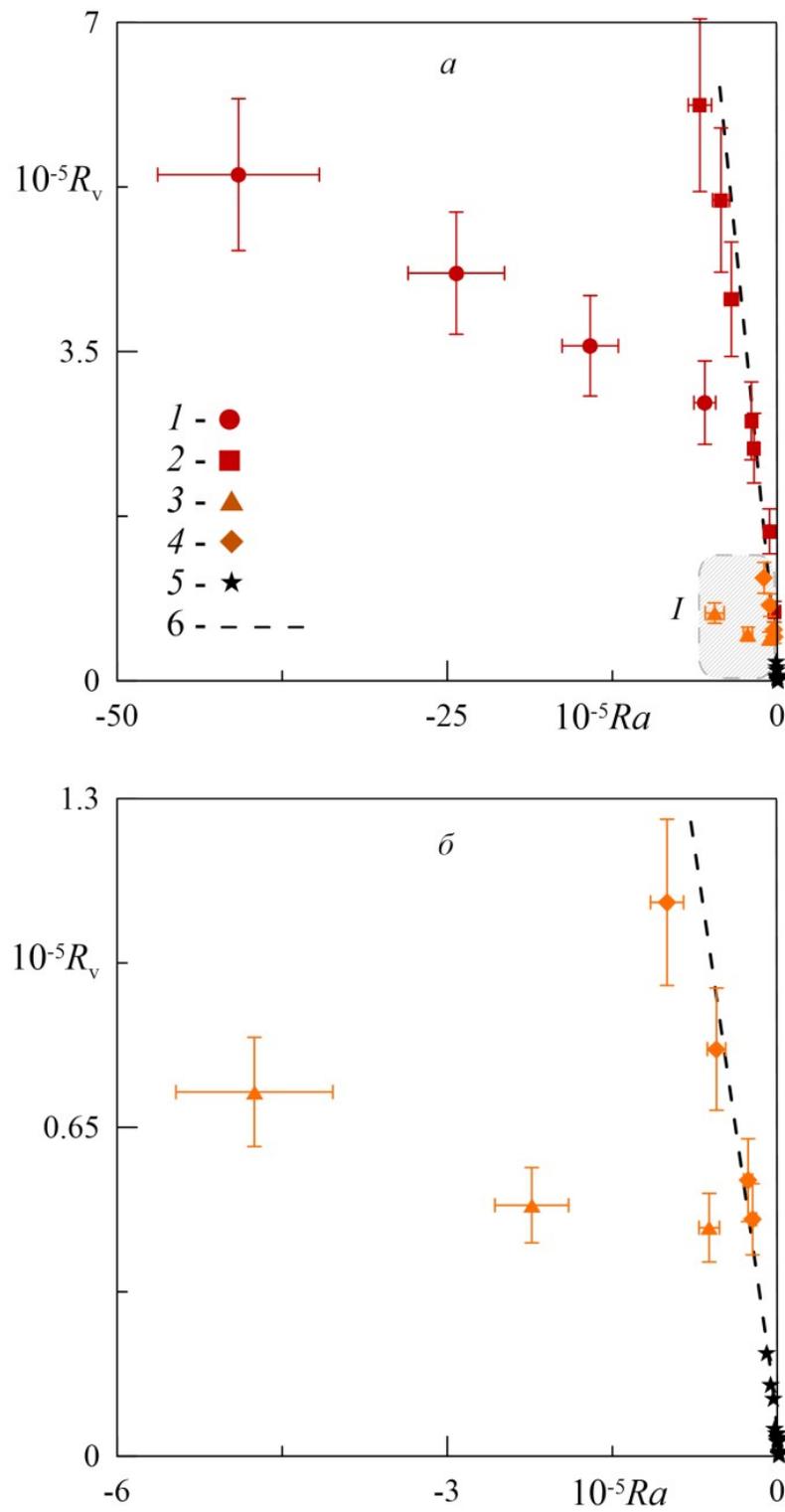


Рис.6. Пороговые кривые на плоскости управляющих параметров в различных масштабах; толстый слой: 1 и 2 – вода, 3 и 4 – водоглицериновый раствор; тонкий слой: 5 – вода; б – линейная теория

Точками 2 и 4 (рис.6) отмечены пороги возникновения двумерных конвективных валов, вытянутых вдоль оси вращения, в толстых слоях, точками 5 – в тонких [ПМТФ]. В первом случае продольные валы возникают на фоне трехмерных азимутальных вихрей. Результаты линейной теории устойчивости [МЖГ2017] для цилиндрических слоев относительной толщины 0.3, 0.8 и 0.99, отмеченные линией б, совпадают с точностью до толщины линии. Наблюдается хорошее согласие с экспериментальными данными. Это свидетельствует о том, что за двумерные конвективные течения ответственен термовибрационный механизм. Расхождение экспериментальных данных и теории связано с различным температурным распределением, вызванным конвективными течениями, возбуждаемыми инерционными волнами. В теории рассматриваются бесконечно длинные слои, поэтому эффекты, возникающие вблизи торцов полости, себя не проявляют.

Глава 2. Интерактивный демонстрационный эксперимент

2.1. Обзор интерактивных демонстрационных экспонатов по физике

Как об этом сказано в [13] законы физики основаны на фактах, установленных опытным путем. Причем нередко истолкование одних и тех же фактов меняется в ходе исторического развития физики. Факты накапливаются в результате наблюдений. Но при этом только ими ограничиваться нельзя. Это только первый шаг к познанию. Дальше идет эксперимент, выработка понятий, допускающих качественные характеристики в форме числа. Чтобы из наблюдений сделать общие выводы, выяснить причины явлений, надо установить количественные зависимости между величинами. Если такая зависимость получается, то найден физический закон. Если найден физический закон, то нет необходимости ставить в каждом отдельном случае опыт, достаточно выполнить соответствующие вычисления.

Изучив экспериментально количественные связи между величинами, можно выявить закономерности. На основе этих закономерностей развивается общая теория явлений. Следовательно, без эксперимента нет, и не может быть, рационального обучения физике; одно словесное обучение физике неизбежно приводит к формализму и механическому заучиванию.

Демонстрационный эксперимент является одной из составляющих учебного физического эксперимента и представляет собой воспроизведение физических явлений учителем на демонстрационном столе с помощью специальных приборов. Он относится к иллюстративным эмпирическим методам обучения. Роль демонстрационного эксперимента в обучении определяется той ролью, которую эксперимент играет в физике-науке как

источник знаний и критерий их истинности, и его возможностями для организации учебно-познавательной деятельности учащихся.

Значение демонстрационного физического эксперимента заключается в том, что:

- учащиеся знакомятся с экспериментальным методом познания в физике, с ролью эксперимента в физических исследованиях (в итоге у них формируется научное мировоззрение);
- у учащихся формируются некоторые экспериментальные умения: наблюдать явления, выдвигать гипотезы, планировать эксперимент, анализировать результаты, устанавливать зависимости между величинами, делать выводы и т.п.

Демонстрационный эксперимент, являясь средством наглядности, способствует организации восприятия учащимися учебного материала, его пониманию и запоминанию; позволяет осуществить политехническое обучение учащихся; способствует повышению интереса к изучению физике и созданию мотивации учения. Но при проведении учителем демонстрационного эксперимента учащиеся только пассивно наблюдают за опытом, проводимым учителем, сами при этом ничего не делают собственными руками. Следовательно, необходимо наличие самостоятельного эксперимента учащихся по физике.

Наиболее характерной проблемой современного этапа модернизации российского образования является подготовка учащихся, готовых адаптироваться к условиям быстро меняющегося информационного общества, способных самостоятельно ставить и решать качественно новые задачи.

Одним из путей решения этой проблемы является повышение эффективности организации самостоятельной работы учащихся при обучении

физике. Физические знания, полученные учащимися и необходимые им во взрослой сознательной жизни, являются базой для изучения общетехнических и специальных дисциплин, освоения новой техники и технологий

С развитием ИКТ и их широким применением в образовательном процессе появилась возможность реализовать демонстрационные эксперименты на качественно новом уровне.

К сожалению, все вышеописанные ресурсы зачастую недоступны среднестатистической школе. Образовательные учреждения не имеют особого финансирования или ресурсов, для обеспечения учащихся необходимыми интерактивными демонстрационными экспериментами. А ведь именно эти установки помогли бы вывести образовательный процесс на новый уровень, в котором учащийся напрямую взаимодействует с установкой, изучает явление и делает соответствующие умозаключения.



Рис.7. Учебный процесс в музее «Город науки и индустрии»

К счастью в наше время создается все больше и больше интерактивных музеев. Чаще всего эти музеи имеют частные инвестиции. Важная особенность музеев – интерактивность (рис.7). С экспонатами можно и нужно взаимодействовать, играть. Таким образом, можно самим практически доказать многие факты, о которых знали раньше только из школьных учебников. Практика гораздо нагляднее и увлекательнее теории, тем более для детей. Ведь, как говорил Альберт Эйнштейн: «Игра — наивысшая ступень научного познания».

После знакомства с музеем у многих ребят может возникнуть интерес к естественным и точным дисциплинам. Посещение музеев также благотворно воздействует на развитие абстрактного и эмпирического типов мышления у детей.

В рамках дипломной работы одной из задач является разработка и изготовление прототипа интерактивной экспериментальной установки для изучения формы границы жидкости во вращающейся полости.

2.2 Интерактивный демонстрационный эксперимент "Движение жидкости во вращающейся системе, форма поверхности жидкости в поле силы тяжести"

1.1 Постановка задачи

В нашей повседневной жизни мы всегда находимся в движении. Вокруг нас все движется. Но, часто ли мы задаемся вопросом, какие виды движения нас окружают? Из курса физики средней школы мы знаем, что существует прямолинейное, криволинейное, равномерное, неравномерное, поступательное и вращательное движение. Из всех приведенных видов движения, вращательное движение самое распространенное. Чтобы подтвердить данное высказывание, давайте взглянем на нашу планету. Наша Земля вращается вокруг своей оси с запада на восток, ось вращения наклонена на угол $66^{\circ} 34'$ к плоскости земной орбиты, полный оборот совершает за одни звездные сутки (23 часа 56 минут 4 секунды). Помимо известного нам вращательного движения, на Землю действуют и дополнительные силы такие как: сила Кориолиса и центробежные силы. Вращение Земли создает центробежные силы, которые приводят к образованию экваториального «вздутия», из-за которого форма Земли отличается от сферической (рис.8).

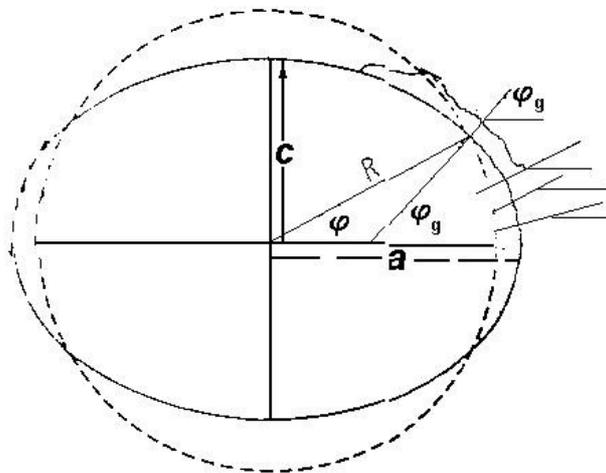


Рис.8. Сравнение шара с действительными параметрами Земли

Часто под термином «эффект Кориолиса» подразумевается наиболее важный случай проявления силы Кориолиса - который возникает в связи с суточным вращением Земли. Так как угловая скорость вращения Земли мала (1 оборот в день), эта сила, как правило, мала по сравнению с другими силами. Эффекты обычно становятся заметными только для движений, происходящих на больших расстояниях при длительных периодах времени, таких как крупномасштабное движение воздуха атмосферы (вихреобразные циклоны) или воды в океане (Гольфстрим). Такие движения, как правило, происходят вдоль поверхности Земли, поэтому для них часто важна только горизонтальная составляющая силы Кориолиса. Она заставляет движущиеся вдоль поверхности Земли объекты отклоняться вправо (по отношению к направлению движения) в северном полушарии и влево в южном. Эффект горизонтального отклонения сильнее вблизи полюсов, так как эффективная скорость вращения вокруг локальной вертикальной оси значительно там и уменьшается до нуля у экватора.

Эффекты силы Кориолиса можно встретить в явлениях окружающей природы. С наличием силы Кориолиса, направленной в северном полушарии вправо и в южном влево, связаны также атмосферные явления: пассаты, циклоны и антициклоны.

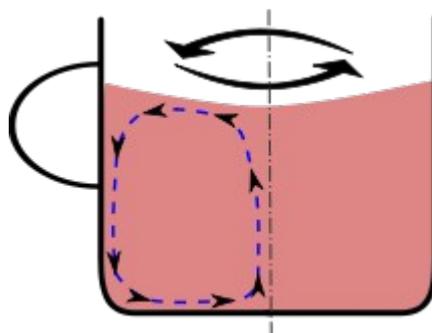


Рис.9. «Парадокс чайного листа». Синим пунктиром обозначена вторичная циркуляция.

Наличие силы Кориолиса можно проверить опытным путем. Нужно всего лишь заварить листовый чай в кружке и пронаблюдать «Парадокс чайного листа» (рис.9). «Парадокс чайного листа» - физический парадокс, заключающийся в том, что при размешивании чая в чашке круговыми движениями ложкой, мы наблюдаем, как чайинки собираются в центре чашки на дне, в то время как «здравый смысл» указывает нам на то, что под действием центробежной силы они должны были бы разместиться по краю.

Механизм этого эффекта раскрыл Альберт Эйнштейн, приведя его в качестве примера, предложенного им для объяснения закона Бэра. Закон Бэра объясняется совместным действием силы Кориолиса и силы трения, создающими вращательное движение масс воды вокруг оси русла.

Роль сил, которые участвуют во вращении Земли, ядра, жидкости очень велика. Давайте поподробнее 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: уравнение движения (1.1), уравнение неразрывности (1.2).

В векторном виде для несжимаемой жидкости они записываются следующим образом:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + 2 \vec{v} \times \vec{\Omega} + \vec{\Omega} \times (\vec{r} \times \vec{\Omega}) + \vec{g} + \nu \Delta \vec{v} \quad (1.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (1.2)$$

где ∇ — оператор Гамильтона, t — время, ν — коэффициент кинематической вязкости, ρ — плотность, P — давление, \vec{v} — векторное поле скоростей, F — векторное поле массовых сил. Неизвестные P и \vec{v} являются функциями времени t и координаты $x \in \Omega$, где $\Omega \subset R^n$, $n = 2, 3$ — плоская или трехмерная область, в которой движется жидкость.

Обычно в систему уравнений Навье - Стокса добавляют краевые (1.3) и начальные условия (1.4), например

$$\vec{v} \Big|_{\partial\Omega} = 0, \quad (1.3)$$

$$\vec{v} \Big|_{t=0} = \vec{v}_0 \quad (1.4)$$

Во вращающихся системах помимо известных сил: силы тяжести, вязких сил; появляются дополнительные силы инерции: сила Кориолиса и центробежная сила.

Целью нашей работы является разработка интерактивного демонстрационного эксперимента для знакомства учащихся с природой возникновения тех особенностей, которые возникают при вращательном движении. А именно влияние центробежной силы инерции.

В эксперименте нас будет интересовать только стационарное положение, при котором скорость отсутствует, этого можно добиться, если мы будем вращать цилиндрическую полость с постоянной частотой в поле силы тяжести.

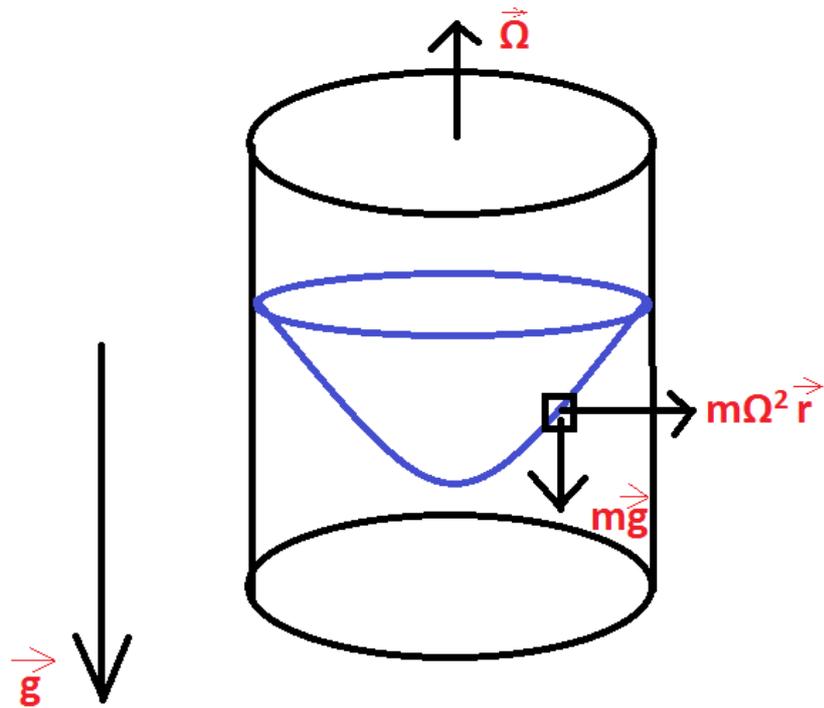
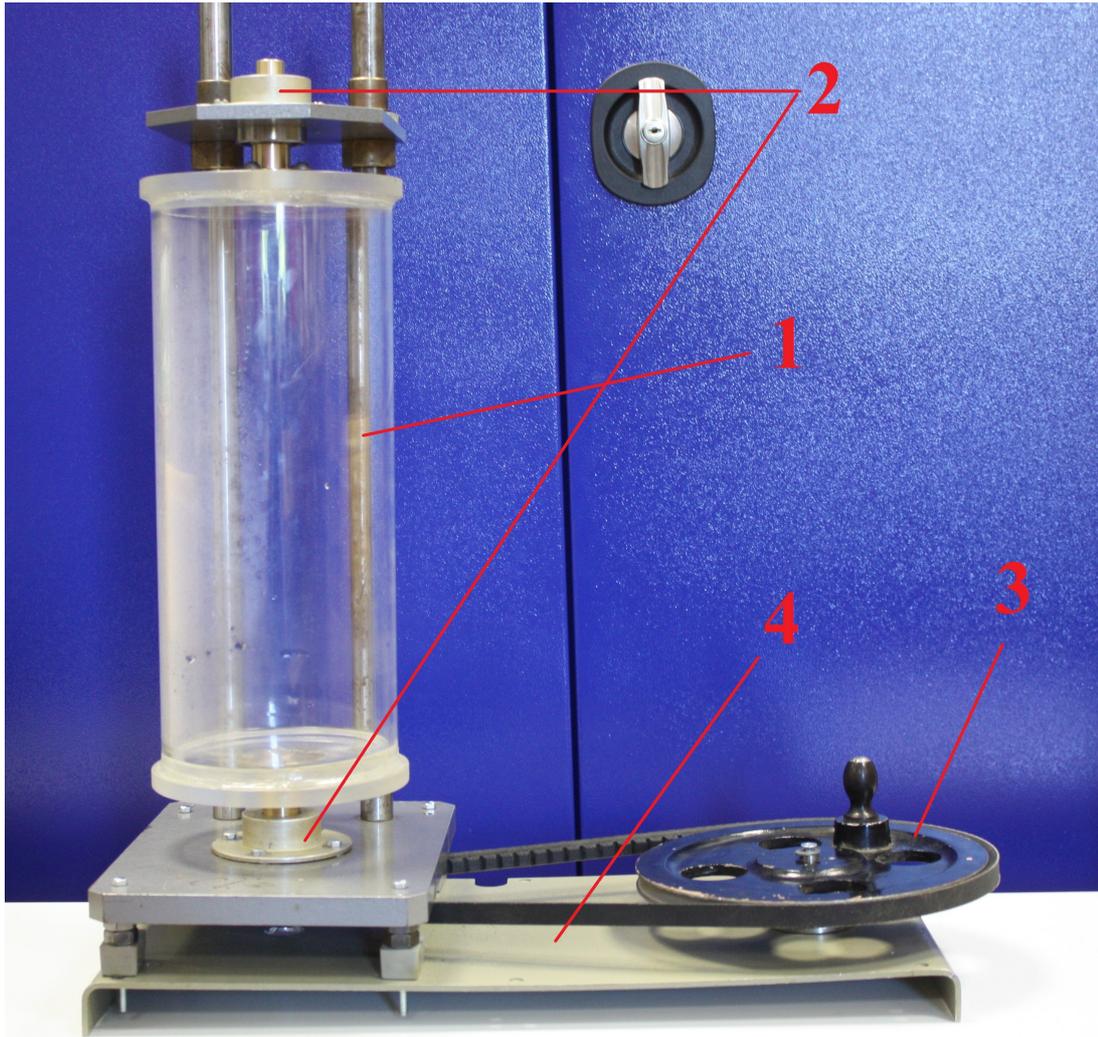


Рис.10. Схема экспериментальной установки

Поле силы тяжести \vec{g} действует в одном направлении, а жидкость в полости, которая вращается с угловой скоростью Ω , приходит в осесимметричное равновесное состояние, которое принимает форму параболы. Данная форма обусловлена тем, что на каждый элемент жидкости одновременно действует центробежная сила и сила тяжести, где центробежная сила зависит от r (рис. 10).

Рассмотрим экспериментальную установку, изготовленную для демонстрации влияния центробежной силы инерции. Для того чтобы учащийся напрямую взаимодействовал с установкой, а не использовал автоматику, была разработана установка с механическим приводом, которая имеет следующую конструкцию (см. рис.11).



a

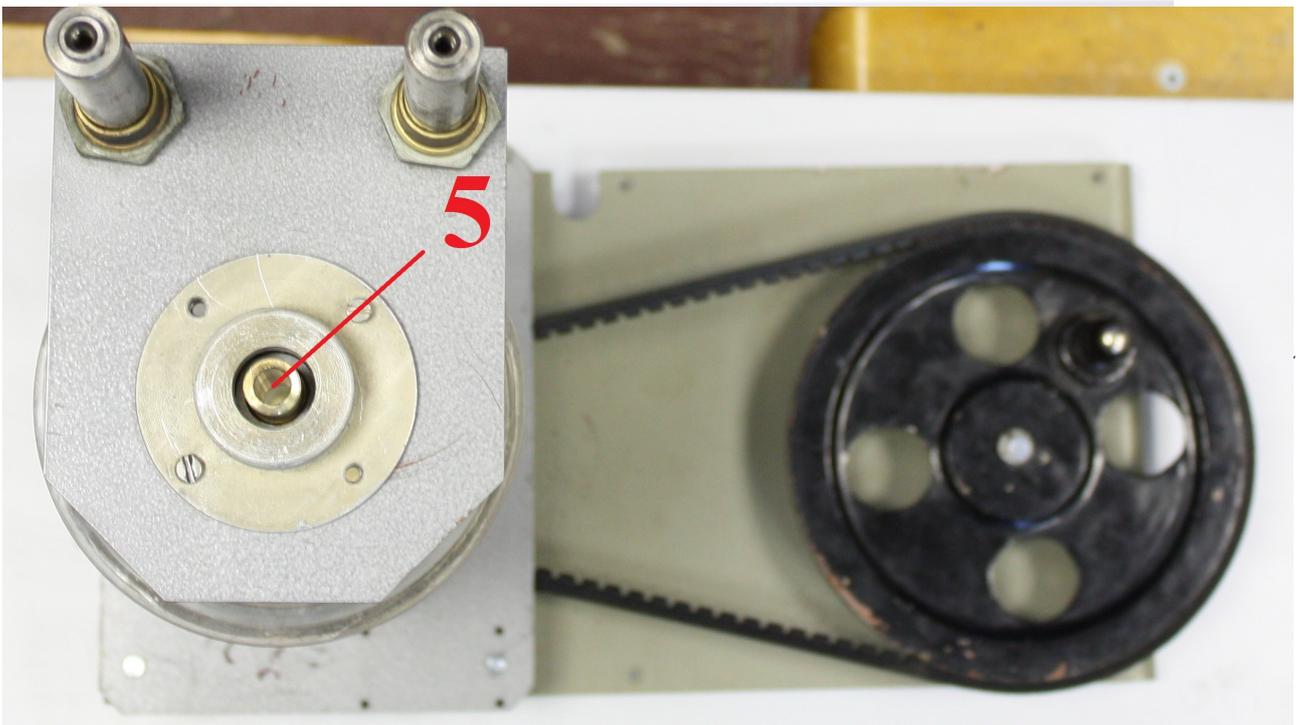


Рис.11. Экспериментальная установка; *a* – вид сбоку, *б* – вид сверху

Элементы установки: 1 – цилиндрическая полость (диаметром 123 мм, длиной 320 мм, образованной плексигласовой трубкой толщиной 5 мм); 2 – шарикоподшипники; 3 – механический привод (диаметр колеса 150 мм); 4 – столик; 5 – полые оси.

В качестве рабочей среды используется вода. Коэффициент привода: 1 оборот механического привода = 3.4 оборота кюветы. Натренированный человек может вращать это колесо до 3 об/с, при этом цилиндрическая полость будет совершать вращения соответственно до 10,2 об/с.

Цилиндр частично заполняется жидкостью и частично воздухом. Целью является изучение формы поверхности свободной жидкости при вращении. Установка может использоваться куда шире, чем на первый взгляд нам кажется. В этой работе, мы лишь ограничиваемся равновесным состоянием, когда жидкость во вращающейся системе находится в состоянии покоя.

Методика и результаты эксперимента.

В установку заливается вода. Кювета приводится во вращательное движение с помощью механического привода. Частота вращения в эксперименте равна 3,4 об/с.

При равномерном вращении, через некоторое время устанавливается параболический профиль. Установившееся (твердотельное) стационарное вращение – состояние, когда жидкость движется вместе со стенками сосуда.

Установка может использоваться в школе в качестве интерактивного демонстрационного эксперимента. Для данного явления старшеклассник может рассчитать высоту параболического профиля, для этого ему нужно уметь интегрировать и дифференцировать. Высоту параболического профиля можно получить из уравнения параболы.

Теория эффекта.

Возьмем уравнение движения жидкости, спроецируем на ось r и ось z . Для элемента жидкости на поверхности выполняется условие – результирующая сила направлена по нормали к поверхности. Это означает, что у этой результирующей силы есть две компоненты: центробежная сила и сила

тяжести. Тангенс угла наклона есть не что иное, как $\frac{\Omega^2 r}{g}$, тогда уравнение примет вид:

$$\frac{\partial z}{\partial r} = \frac{\Omega^2 r}{g}$$

После интегрирования получаем:

$$z = \frac{\Omega^2 r^2}{2g}$$

z – высота, отсчитанная от нижней точки поверхности при $r = 0$.

В эксперименте при заданной угловой скорости ω , мы можем легко посчитать высоту параболоида вращения. Эта высота равна:

$$h = \frac{\Omega^2 R^2}{2g}, \text{ здесь } R \text{ – радиус цилиндрической полости.}$$

Учащийся умеющий интегрировать может с легкостью найти высоту параболоида вращения.

Если жидкость находится в состоянии покоя и кювета приводится во вращение, то жидкость увлекается во вращение за счет вязкого взаимодействия со стенками кюветы. И при этом время переноса импульса от стенки внутрь этой жидкости – это время увлечения всей жидкости во вращение. Характерное время установления таких процессов:

$$\tau = \frac{R^2}{\nu}$$

Оценим τ , взяв параметры нашей установки. Получаем $\tau = 3600$ с. На самом деле все происходит гораздо быстрее, за счет того что внутри нашего цилиндра возникают циркуляционные течения, которые переносят момент импульса. Если оценить характерное время таким способом, то установление профиля происходит за время значительное меньшее. Оно составляет 90 с. Это объясняется наличием циркуляционного движения внутри, связанного с нижним торцом.

Действительно в эксперименте мы наблюдаем характерное время установления. Мы приводим систему во вращение в некоторый момент времени с постоянной угловой скоростью:

На рис. 12 приведены фотографии, полученные с интервалом во времени в 30 секунд:

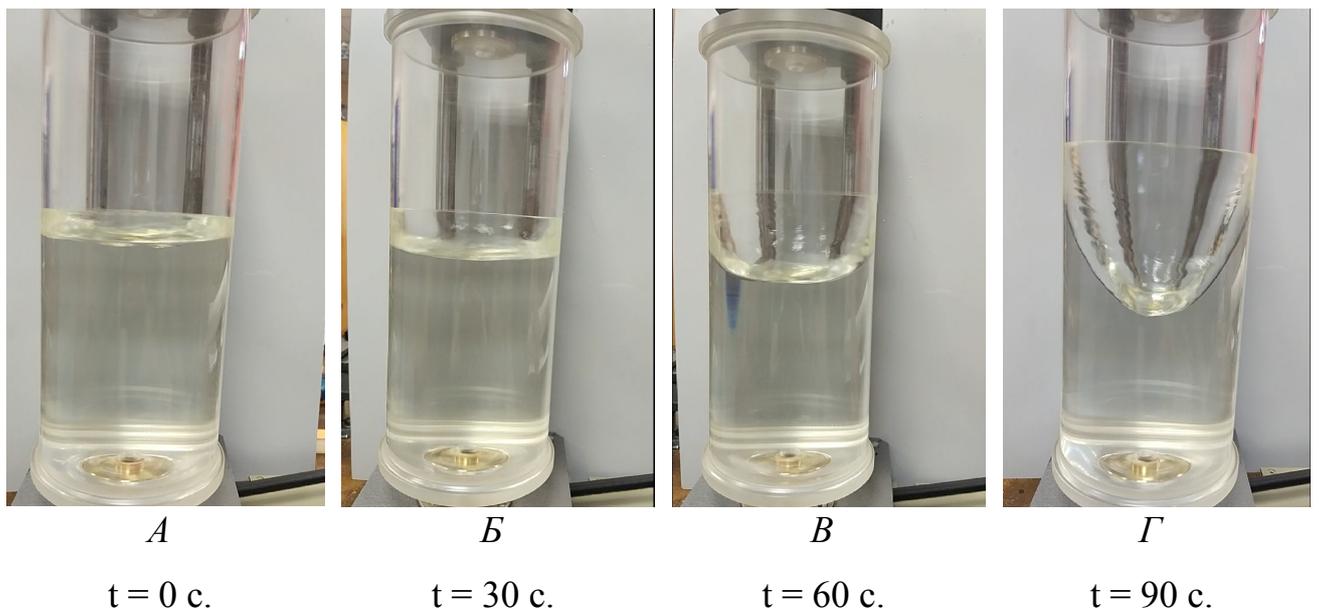


Рис.12. Процесс увлечения жидкости вращающейся полостью

Первая фотография соответствует началу вращения.

Заключение

Экспериментально исследована тепловая конвекция в толстом горизонтальном коаксиальном зазоре при вращении. Обнаружено две моды неустойчивости: трехмерные тороидальные вихри и двумерные продольные валы. Показано, что порог возбуждения азимутальных течений связан с распространением инерционных волн и располагается значительно ниже порога появления продольных валов, которые имеют термовибрационную природу. Показано, что допороговые конвективные течения оказывают значительное влияние на термовибрационную конвекцию только при больших перепадах температуры на границах слоя. В остальных случаях наблюдается хорошее согласие результатов линейной теории с данными экспериментальных работ в большом диапазоне управляющих параметров: центробежного и вибрационного чисел Релея.

В рамках данной дипломной работы была рассмотрена роль эксперимента при обучении физике, проблемы его реализации в школьных учреждениях. Сделан обзор интерактивных демонстрационных экспонатов по физике. Разработан интерактивный демонстрационный эксперимент "Движение жидкости во вращающейся системе, форма поверхности жидкости в поле силы тяжести". Проведена апробация установки, проверена ее эффективность и наглядность полученного эффекта. Сделаны фотографии исследуемой формы поверхности. Предложены решения проблемы визуализации формы поверхности.

Список литературы

1. *Голицын Г.С.* Природные процессы и явления: волны, планеты, конвекция, климат, статистика. М.: Физматлит, 2004. 344 с.
2. *Lappa M.* Rotating thermal flows in natural and industrial processes. N.Y.: Wiley et al. 2012. 522 p.
3. *Gershuni G.Z., Lyubimov D.V.* Thermal vibrational convection. N.Y.: Wiley et al. 1998. 358 p.
4. *Козлов В.Г.* Вибрационная конвекция во вращающихся полостях // изв. РАН. МЖГ. 2004. № 1. С. 5–14.
5. *Вяткин А.А., Иванова А.А., Козлов В.Г.* Способ вибрационного управления неоднородными по плотности гидродинамическими системами во вращающихся контейнерах // Патент на изобретение №2598454, 27.09.2016.
6. *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.
7. *Вяткин А.А., Иванова А.А., Козлов В.Г.* Конвективный теплоперенос во вращающемся горизонтальном цилиндрическом слое // ПМТФ, 2016. Т. 57. № 2 (336). С. 172-181.
8. *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.
9. *Вяткин А.А., Иванова А.А., Козлов В.Г., Рысин К.Ю.* Влияние тангенциальной составляющей силового поля на конвекцию во вращающемся плоском слое // Изв. РАН. ФАО, 2017, Т. 53, № 2, С. 215–222.
10. *Вяткин А.А., Козлов В.Г., Сураев Р.Р.* О конвективной устойчивости жидкости во вращающемся горизонтальном цилиндрическом слое // Изв. РАН. МЖГ, 2017. № 4. С. 73–84.
11. *Maas L.R.M.* On the amphidromic structure of inertial waves in a rectangular parallelepiped // Fluid Dynamics Research. 2003. V. 33. P. 373–401.
12. *Greenspan H.P.* The Theory of Rotating Fluids. Cambridge University Press. New York, 1968. 328 p.
13. *Селиверстов Александр Александрович.* Физический эксперимент и его роль в обучении физике. Доклад на секции учителей физики. Опубликовано 05.02.2013. Электронный ресурс (<https://clck.ru/Df26E>).