V Международный конкурс

исследовательских работ школьников

Research start

Наименование секции: ФИЗИКА

Исследовательская работа

**ВОДНАЯ СПИРАЛЬ**

Каучакова Марина

учащаяся 11 класса

ГБ НОУ «Лицей №84 им. В. А. Власова», Новокузнецкий городской округ

Научный руководитель:

Талабира Оксана Ивановна

учитель физики МБНОУ «Лицей № 84 им. В.А. Власова»

Новокузнецкий округ, 2022

Оглавление

[Введение 3](#_Toc65102655)

[Описание экспериментальной установки 4](#_Toc65102657)

[Почему образуется спираль? 5](#_Toc65102658)

[Математическая модель](#_Toc65102659) 7

[Экспериментальная часть](#_Toc65102660) 10

[Выводы](#_Toc65102662) 12

[Литература](#_Toc65102663) 13

# **Введение**

Среди задач IPYT-2022 есть задача «Водная спираль»: Струя жидкости, вытекая через небольшое отверстие, может закручиваться в спираль. Объясните это явление и исследуйте условия, при которых струя принимает форму спирали.

Я заинтересовалась этим явлением и решила рассмотреть его подробнее.

**Объект исследования:** струя жидкости.

**Предмет исследования:** спиралевидная струя жидкости.

**Актуальность и новизна работы.** Поток жидкости, вытекая из отверстия, может принимать форму цепочки текучей среды: последовательность взаимно ортогональных звеньев, каждое из которых состоит из тонкой овальной пленки, связанной относительно толстыми ободками жидкости. Почему струя жидкости может принимать такую необычную форму? От каких параметров и как зависит характеристики струи?

**Цель работы:** Исследовать поведение водной струи.

**Задачи работы:** Исследовать причины закручивание струи жидкости в струю и установить параметры, влияющие на характеристики струи.

# **Описание экспериментальной установки**

Моя установка для исследования спиралевидной водной струи состоит из следующих частей:

Клин склеенный из 4 стеклянных пластин 9,2 см×6,2 см (рис.1-3), так что его нижние грани образовывали прямоугольное отверстие 6,2 см×0,6 см, через которое жидкость будет вытекать.

Шланг с регулируемым напором жидкости, через который вода подводилась в клин. Объёмный расход поступающей жидкости изменялся от 20 мл/с до 100 мл/с.

Весь процесс записывался на скоростную камеру для последующей обработке.

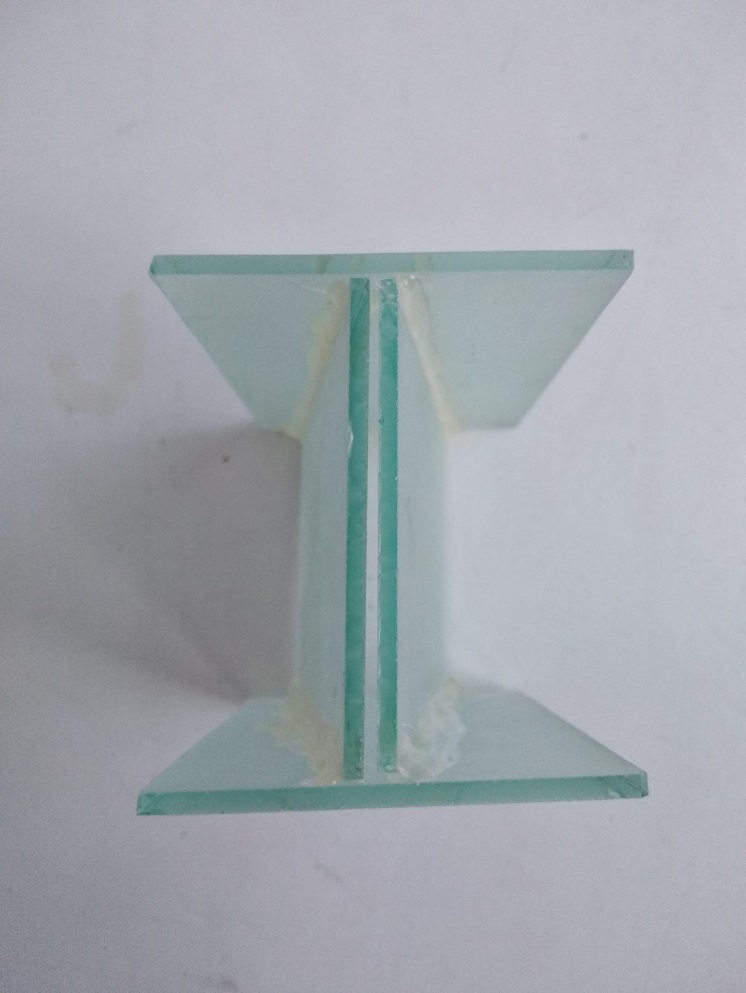
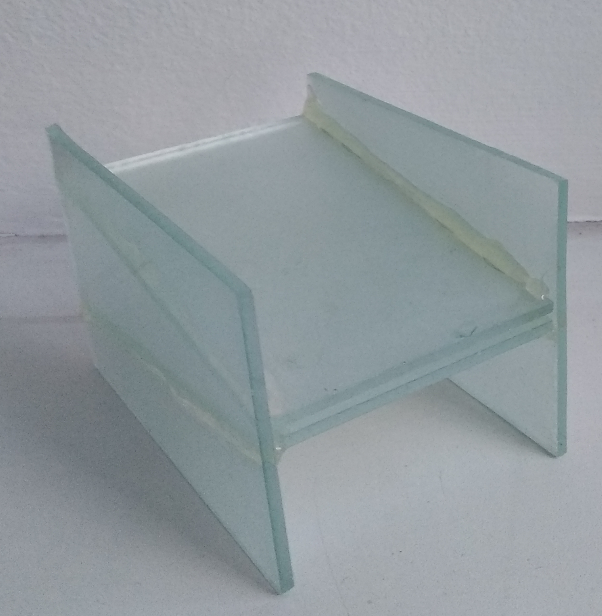
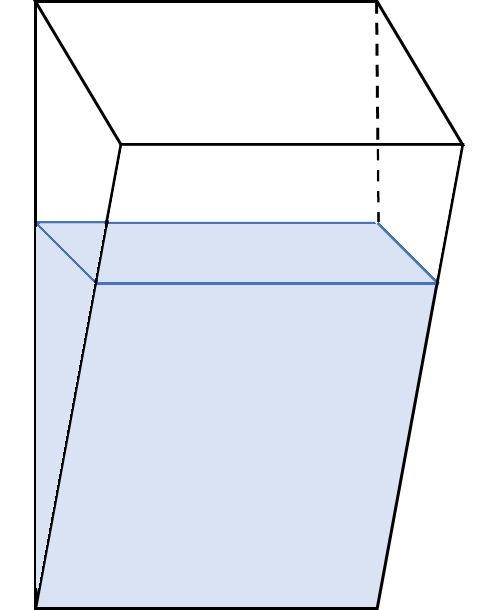
****

Рис. 3

Рис. 2

Рис. 1



**Почему образуется спираль?**

# Жидкость вытекая из отверстия имеет несколько составляющих скорости: направленная вертикально вниз, обусловленная напором шланга и горизонтальная обусловленная геометрией отверстия. Тогда по середине струя будет иметь вертикальную скорость, а по краям помимо вертикальной будет горизонтальная составляющая скорости. Но на струю действует сила искривления, связанная с поверхностным натяжением, нормально к краям слоя жидкости и таким образом ограничивает его протяженность, стягивая струю. Сила поверхностного натяжения заставляет «лист» втягиваться и в конечном итоге закрываться, таким образом образуется вершина первого звена. Жидкость скапливается на краях листа, образуя относительно толстые ободки, ограничивающие жидкий слой. Когда эти обода сталкиваются в вершине звена, они дают начало другому тонкому листу в плоскости, перпендикулярной первому звену. Поскольку в силу инертности жидкости, она сохраняет часть своей горизонтальной скорости, которая и объясняет образование следующих звеньев. Горизонтальную скорость имеет жидкость только по краям. Таким образом, лист утончается, до тех пор, пока не достигнет края «листа». Сила поверхностного натяжения заставляет «лист» втягиваться и в конечном итоге закрываться, таким образом образуется вершина уже второго звена. Процесс повторяется, создавая взаимно ортогональные связи, которые постепенно уменьшаются до тех пор, пока цепочка не соединится в цилиндрический поток под действием вязкости жидкости.

Струя, вытекая из отверстия имеет овальную форму, из-за формы отверстия возникает дисбаланс силы поверхностного натяжения, которые стремятся придать струе округлую форму.

# В центре возникает избыточное давление, вследствие которого наибольшие грани приобретают ускорение от центра. И струя снова приобретает эллиптическую форму. Колебания повторяются.

Обратная фаза колебания сечения струи

Колебания повторяются

Таким образом, поверхностная энергия преобразуется в кинетическую энергию и наоборот и причиной формирования спирали является колебания жидкости.

# **Математическая модель**

Из качественного объяснения следует, что изменение импульса струи в горизонтальном направлении (её стягивание, образование звеньев) обусловлено силами поверхностного натяжения. Тогда второй закон Ньютона в импульсной форме для этого случая можно записать так:

, где -сила поверхностного натяжения воды

-плотность воды,

-ширина отверстия, м

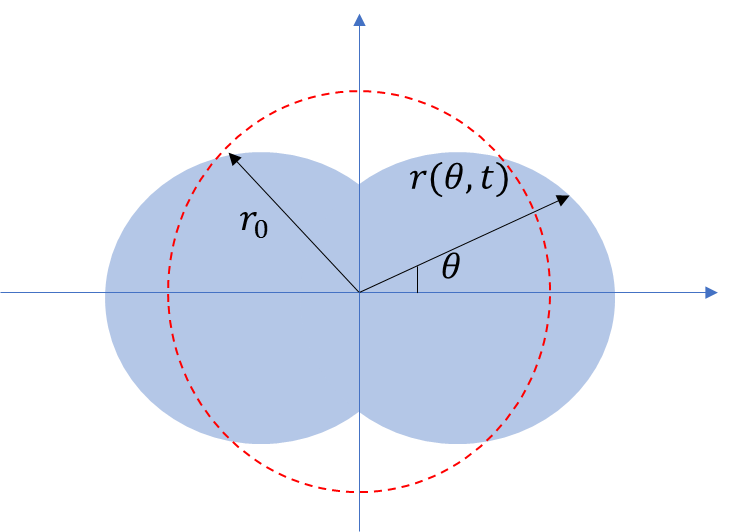
- длина отверстия, м

-длина звена цепи, м

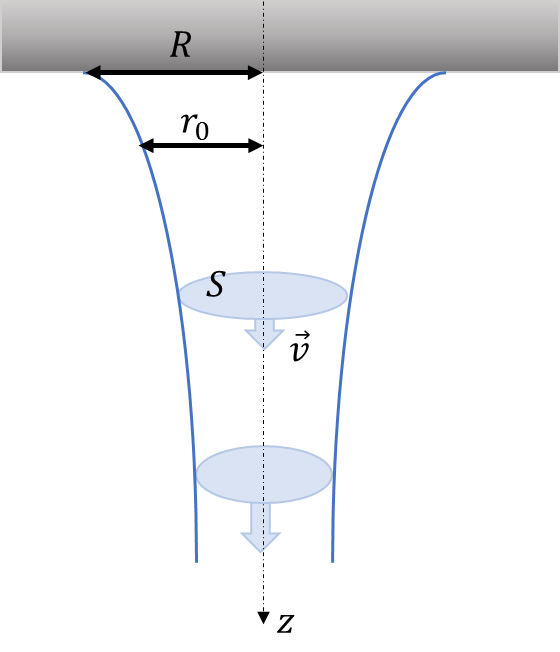
-вертикальная скорость струи, м/с

-горизонтальная скорость струи, м/с

-коэффициент поверхностного натяжения, Н/м

Для того, чтобы описать колебания сечения струи в полярных координатах, воспользуемся данной формулой, выведенной в статье [1]:

Из данной формулы следует формула для частоты колебаний струи.

Записав скорость слоя воды из закона сохранения энергии и уравнение непрерывности несжимаемой жидкости, можно получить формулу для радиуса струи, откуда следует, что гидравлический радиус уменьшается с **высотой. При этом частота колебаний увеличивается.

-угол поворота радиуса, рад

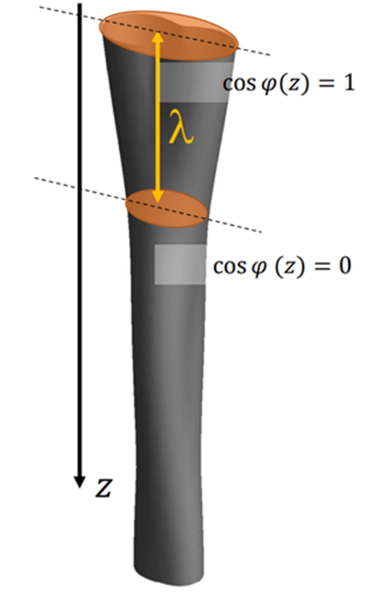
-мода колебаний

-полярный радиус, м

-радиус круглого сечения той же площади, м

-начальная угловая скорость, рад/с

Подставив формулу для гидравлического радиуса в уравнение для частоты колебаний можно получить новое уравнение для колебаний струи. С помощью математических преобразований можно получить, что длина звенья и её радиус связаны следующим образом.

****

Также можно найти фазу колебания струи, она равна π/2, что подтверждает наше качественное объяснение, в котором звенья перпендикулярны друг другу.

-начальный радиус струи, м

- площадь поперечного сечения струи,

-ускорение свободного падения,

-начальная угловая скорость, рад/с

-скорость струи, м/с

-начальная скорость струи, м/с

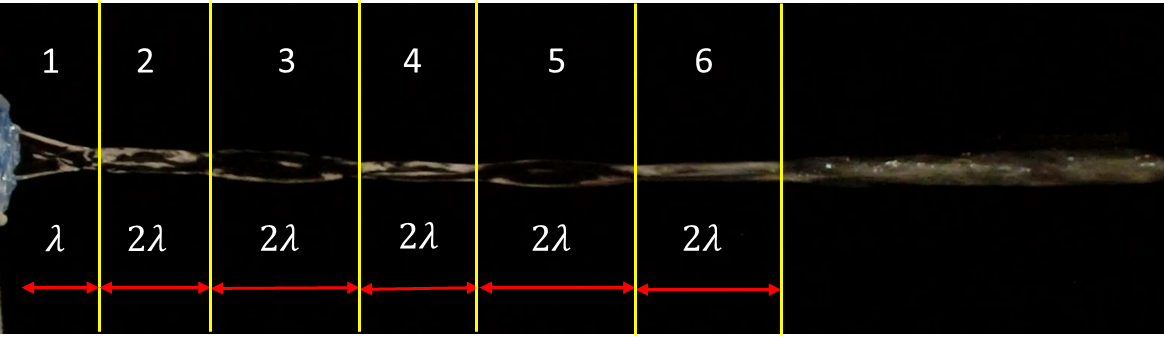
-гидравлический радиус струи, м

-шаг спирали, м

-число Вебера

# **Проверка экспериментальных зависимостей**

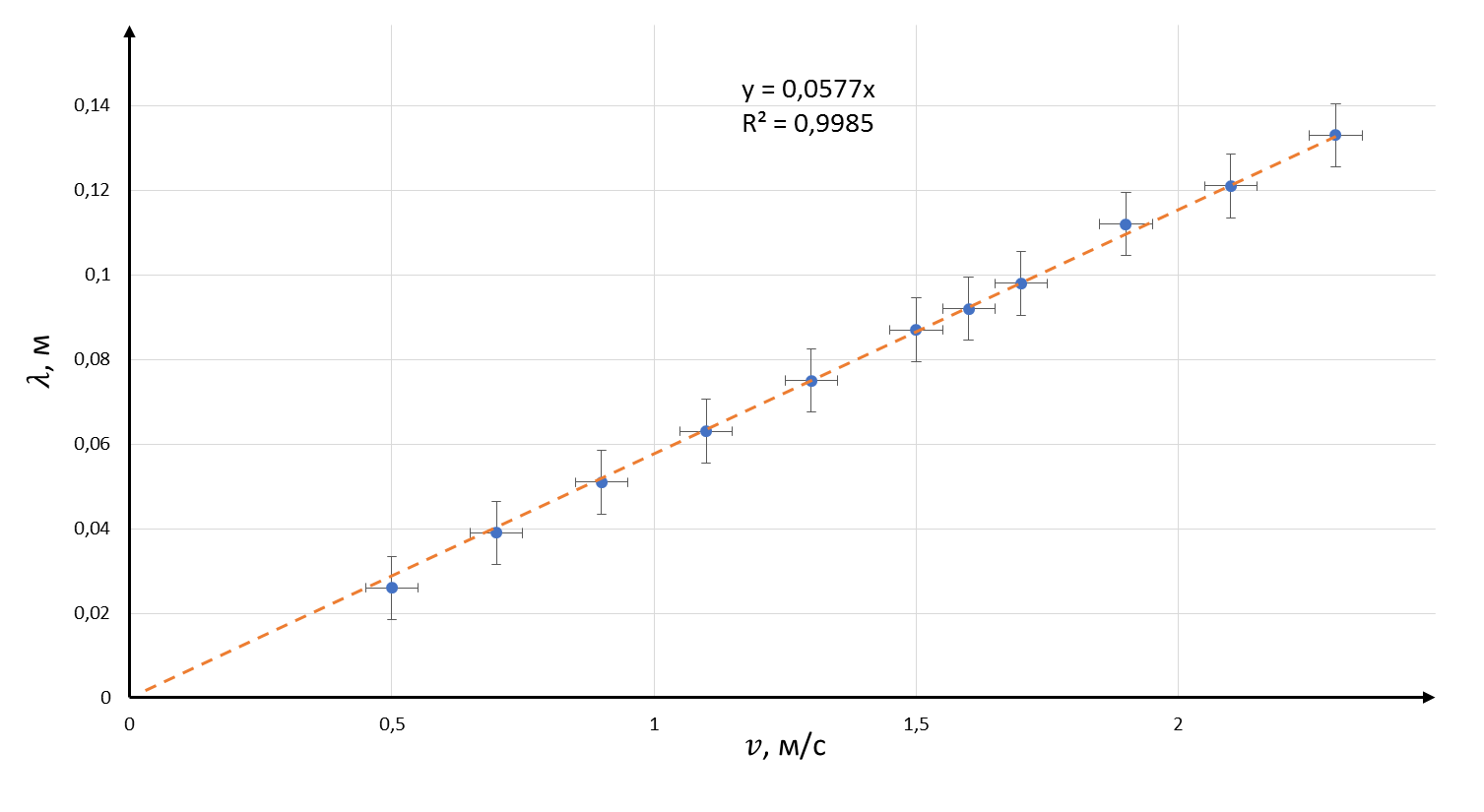
По формуле полученной в нашей математической модели можно рассчитать длину шага звена спирали.



Мы постояли график зависимость длины звена от номера витка и наблюдаем хорошую сходимость теории и эксперимента

# 

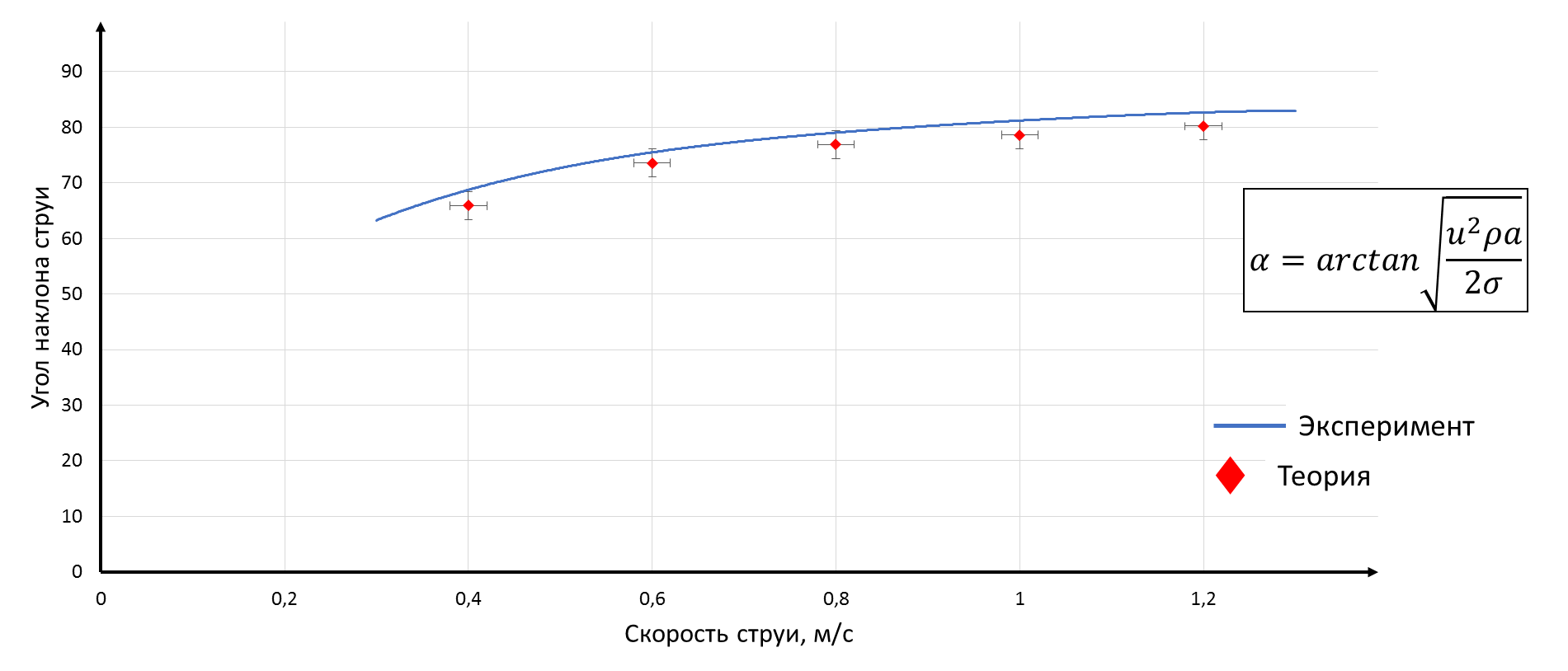
Далее мы проверили зависимость шага спирали (длины первого звена) от скорости струи.

****Из математической модели следует, что зависимость линейная. Построив график по экспериментальным данным, сравнив значения из уравнения линии тренда и эксперимента и выведя уровень аппроксимации, можно сказать, что зависимость шага спирали (длины первого звена) от скорости струи выполняется.

Из уравнения линии тренда:

В эксперименте:

Проверим зависимость угла наклона спирали от скорости струи. Будем изменять скорость вытекания струи и посмотрим, как изменится угол наклона струи. По графику видно, что зависимость выполняется.

****

# **Выводы**

В результате проделанной работы, мы установили, что причина образования звеньев цепи – начальная асимметрия отверстия, приводящая к колебаниям слоя воды.

Мы установили, что наблюдаемое нами явление есть колебание сечения потока.

Мы пронаблюдали явление, воспроизводя его с помощью различных установок и для разных типов жидкости. Трассировали видео истечения струи для определения скоростей движения в центе струи и по краям и для определения характера движения отдельных частей струи.

Нами была построена математическая модель определяющая частоту колебания струи , установлено, что отношение шага спирали к гидравлическому радиусу струи определяется формулой и зависит от: плотности жидкости, скорости истечения жидкости, коэффициента поверхностного натяжения (рода жидкости, температуры, наличия примесей). Так же мы установили, что соотношение сторон спирали определяется числом Вебера и соотношением сторон щели.

Нами были исследованы зависимости шага спирали от поверхностного натяжения, геометрии струи и скорости потока, угла наклона спирали от скорости потока.

В дальнейшем планируется продолжить параметрическое исследование задачи, а также рассмотреть другие моды колебаний и нелинейные случае задачи.

**Литература**

1. N. Bohr, Determination of the surface-tension of water by the method of jet vibration

2. Lord Rayleigh, On the capillary phenomena of jets

3. J. Bush, On the collision of laminar jets: fluid chains and fishbones

1. <https://iptnet.info/wp-content/uploads/2018/12/X-10-Vo.pdf>
2. Determination-of-surface-tension-by-a-water-vibration.pdf
3. On-the-capillary-phenomena-jets.pdf