

Всероссийский конкурс учебно-исследовательских работ старшеклассников по
политехническим, естественнонаучным, математическим дисциплинам для
учащихся 9-11 классов

Сжатие водяного купола под действием поверхностного натяжения жидкости

Выполнили:

Д.Д.Черных 201 класс гр.а

Ю.П.Иванова 201 класс гр.а

В.В.Светлова 201 класс гр.б

Научный руководитель:

Имакаев Виктор Раульевич

(Кандидат педагогических наук,

доктор философских наук,

доцент кафедры педагогических

инноваций и технологий)

2015-16 г.

Содержание

Введение.....	3
I. Что такое водяной колокол.....	4
II. Цели и задачи.....	5
III. Актуальность.....	6
IV. Обзор научной и методической литературы по проблеме исследования.....	7
V. Описание исследований водяного купола в научной литературе	9
VI. Параметры, от которых зависит образование купола	11
VII. Практическая часть. Первые опыты по получению купола	13
VIII. Исследование поведения струи при разных диаметрах	18
IX. Исследование поведения струи при разных температурах вод.....	22
X. Сравнение теоретических данных с практическими.....	25
Заключение.....	29
XI. Литература.....	30
XII. Приложение.....	31

Abstract.

This work is devoted to the problem of influence of water surface tension on the quality of painting some solid surface. The investigation of water surface tension with the help of dynamic water bell allows to determine the influence of different factors on this phenomenon more accurately. The main subject of the work is dynamic water bell. The aim of the research is to study and to describe the influence of various condition (temperature, disc size, surface material, etc.) on the form of the water bell. To achieve the aim, it was necessary to accomplish the following tasks: to determine the conditions which affect surface tension; to carry out an experiment; to specify the conditions of the water bell forming;

The result of the work has shout the dependence of liquid particles movement from changing some parameters and conditions of in severable water bell formation. In conclusion it should be noted that water bell formation directly depends on the temperature of water, disc size (on which the water is falling), the material the disc is made of and it also depends, in the speed of water particles falling on the disc. The results obtained can be applied in the sphere of painting any surfaces for improving the quality of paints.

I. Что такое водяной купол (колокол)

Водяной колокол образуется тогда, когда на пути струи воды находится препятствие. В зависимости от изменения параметров объекта, который служит препятствием струе (тип, форма, размер), водяные колокола можно легко изменять. Колокол формируется и может быть изменен путем простой регулировки скорости потока из-под крана. В нашем случае препятствием служит диск. Если струйка воды падает в центр диска, то вода разливается по диску и, стекая с его краев, образует тонкую прозрачную пленку. Эта пленка может даже замкнуться на стержне, на котором укреплен диск; Тогда возникает красивый водяной пузырь, имеющий форму колокола.

Многие ученые девятнадцатого и двадцатого века с помощью экспериментов пытались вывести уравнение движения воды, измерить поверхностное натяжение воды и даже рассмотреть ситуации, когда есть разница между давлениями внутри и снаружи колокола. Кроме того, водяной купол – это наглядная демонстрация действия сил поверхностного натяжения, поэтому его можно использовать в качестве объяснения этого явления.

II. Цели. Задачи

Цель нашей работы:

- Исследовать и описать влияние различных факторов на форму купола.

Задачи:

1. Изучить тему поверхностного натяжения жидкости, освоить тему гидродинамики.
2. Определить, какие параметры нужно измерять для изучения данного явления.
3. Пронаблюдать явление сжатия водяного купола и зафиксировать условия его образования.
4. Исследовать изменение формы купола при разных диаметрах диска при неизменных условиях.
5. Проанализировать влияние температуры на форму купола.

III. Актуальность

Поверхностное натяжение является определяющим фактором многих технологических процессов: флотации (разделение твердых мелких частиц и образования капель из эмульсии), пропитки пористых материалов, нанесения покрытий, моющего действия, порошковой металлургии, пайки и др. Велика роль поверхностного натяжения в процессах, происходящих в невесомости.

Среди современных актуальных проблем - развитие теории поверхностного натяжения различных жидкостей (включая расплавленные металлы), влияние кривизны поверхности на поверхностное натяжение.

- 1- В научной сфере рассмотрены методы и технические средства сбора нефтепродуктов с поверхности воды. На основе анализа, в том числе и теоретического, с учетом зарубежного опыта обоснован приоритет метода сбора нефти с поверхности небольших акваторий за счет сил поверхностного натяжения.

Нефть и ее продукты в водах поверхностного стока могут находиться в двух состояниях. Первое состояние – эмульсионное, когда двухфазная жидкость представляет собой неоднородную систему, которая состоит из капель воды, распределенных между молекулами нефти или ее продуктов. Размер частиц в эмульсиях составляет 10^{-7} – 10^{-5} м. Второе состояние – стратифицированная жидкость, независимо от толщины нефти или ее продуктов на поверхности воды. При эмульсионном состоянии нефти и ее продуктов в воде их выделение наиболее доступно следующими методами:

- сепарация в поле больших центробежных сил. Метод реализуется на центрифугах и характеризуется возможностью обработки лишь небольших объемов воды и высокими энергозатратами, что не позволяет использовать его при очистке вод поверхностного стока;
- фильтрование, как на напорных, так и на безнапорных фильтрах.

- 2- Значение поверхностного натяжения главным образом используется при покраске различных объектов. В зависимости от его величины можно определить, хорошо ли краска будет ложиться на окрашиваемую поверхность, или же нужно будет предпринимать дополнительные меры. Для того чтобы определить свойство краски или лака «разливаться» в зависимости от наличия в них растворителя можно было бы воспользоваться вычислением поверхностного натяжения на поверхности соприкосновения твердой и жидкой фаз.

IV. Обзор научной и методической литературы по проблеме исследования

Поверхность жидкости обладает загадочным на первый взгляд свойством. Она стремится сократиться так, чтобы площадь ее поверхности была минимальной.

Молекулы поверхностного слоя в среднем находятся на большем расстоянии друг от друга, чем молекулы внутри жидкости. Жидкость в поверхностном слое находится в растянутом, напряжённом состоянии. Жидкость в поверхностном слое растянута, и поэтому вдоль поверхности действует сила, стремящаяся сократить эту поверхность.

Молекулы поверхностного слоя жидкости обладают избытком потенциальной энергии, по сравнению с энергией, которой эти молекулы обладали бы, находясь внутри жидкости.

Избыточную потенциальную энергию, которой обладают молекулы на поверхности жидкости, называют поверхностной энергией.

Коэффициент (поверхностного натяжения) = отношение поверхностной энергии к площади поверхности жидкости ($\text{Дж} / \text{м}^2$).

Поверхностное натяжение представляет собой удельную поверхностную энергию, то есть энергию, приходящуюся на поверхность единичной площади.

Силу, которая действует вдоль поверхности жидкости перпендикулярно линии, ограничивающей эту поверхность, и стремится сократить её до минимума, называют силой поверхностного натяжения. $F = (\text{коэффициент поверхностного натяжения}) \times L$. Коэффициент поверхностного натяжения уменьшается с ростом температуры и зависит от растворённых в жидкости примесей.

Если силы притяжения между молекулами жидкости и твёрдого тела больше силы притяжения между молекулами самой жидкости, то такая жидкость называется смачивающей. Если же силы притяжения между молекулами жидкости больше сил притяжения молекул твёрдого тела и молекул жидкости, то такая жидкость называется несмачивающей.

Форма поверхности жидкости в том месте, где она соприкасается с твёрдой стенкой и газом, зависят от того, смачивает или не смачивает жидкость стенки сосуда. Если жидкость является смачивающей, то угол θ между касательной к поверхности жидкости и твёрдым телом на общей границе трёх сред, отсчитывается внутрь жидкости (краевой угол), острый. В том случае, когда жидкость не смачивает твёрдое тело, краевой угол θ тупой. В случае полного смачивания $\theta = 0^\circ$, а полного несмачивания - $\theta = 180^\circ$.

Давление под выпуклой поверхностью жидкости больше давления под плоской поверхностью жидкости, а давление под вогнутой поверхностью жидкости меньше давления под плоской поверхностью. [1, с. 238-263]»

Формула разности давлений под цилиндрической поверхностью: $P - P_A = \frac{\sigma}{r}$

Формула разности давлений под сферической поверхностью: $P - P_A = \pm \frac{2\sigma}{r}$

(+, если поверхность выгнута и – если, поверхность вогнута);

Формула разности давлений для любой поверхности: $P - P_A = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$

Под капиллярными явлениями понимают подъём или опускание жидкости в узких трубках – капиллярах – по сравнению с уровнем жидкости в широких трубках.

В этих трубках жидкость либо поднимается вверх на высоту $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$, либо опускается вниз на расстояние, определяемое по той же формуле.

V. Описание исследований водяного купола в научной литературе

Существует множество научных трудов, в которых описан водяной купол

1- «Физический фейерверк» Джон Уокер

«Если струйка воды попадает в центр диска, то вода разливается по диску и, стекая с его краёв, образует тонкую прозрачную плёнку. Эта плёнка может замкнуться даже на стержне, на котором укреплен диск; тогда возникает красивый водяной пузырь, имеющий форму колокола. [2, с. 110, явл.4.114]».

Некоторые вопросы остаются без ответа до сих пор. Например: Отчего пленка воды загибается внутрь? Чем определяется форма «колокола»?

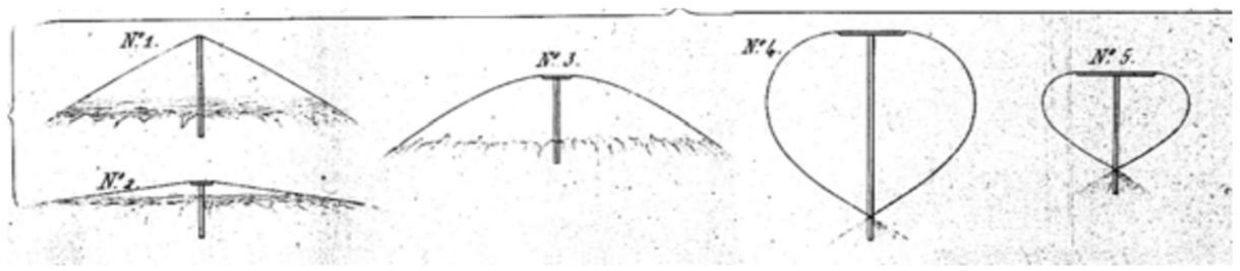


2- The Dynamics of Water Bells Eleanor C. Button

Водяной колокол образуется тогда, когда на пути струи воды находится препятствие. В зависимости от изменения параметров объекта, который служит препятствием струе (тип, форма, размер), водяные колокола можно легко изменять. Колокол формируется и может быть изменен путем простой регулировки скорости потока из-под крана.[3]

Например, экспериментальным путем пытаются установить критический радиус, в который попадает разбрызгивающаяся жидкость.

Исследование водяного купола помогает пролить свет на свойства жидкостей и особенности ее движения.



VI. Параметры, от которых зависит образование купола

Параметрами, от которых зависит, образуется купол или нет, являются: диаметр струи, диаметр диска и скорость падения струи. Диаметр диска измеряется непосредственно, а для определения скорости падения и диаметра струи следует:

1- измерить объемный расход воды, определить диаметр крана

Для того чтобы измерить объемный расход воды, берется емкость со шкалой для отмеривания объема жидкости. Засекается время и отмеряется соответственный объем воды. Далее по ниже представленным формулам находится (начальная) скорость струи в момент вытекания из крана.

$$Q = \frac{V}{t}$$
$$v_0 = \frac{Q}{S} = \frac{4 * V}{\pi * d_0^2 * t}$$

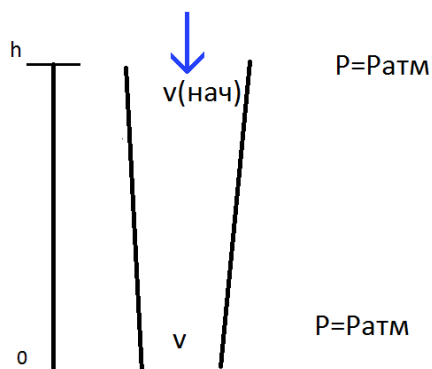
Где Q-объемный расход воды, V-объем ёмкости со шкалой, t-время наполнения емкости,

S- площадь сечения крана, d_0 -диаметр сечения крана

2 – составить уравнение Бернулли и уравнение неразрывности

При изменении высоты растёт скорость частиц. Скорость и диаметр струи над уровнем диска находятся с помощью уравнения Бернулли:

$$p_{атм} + \rho gh + \frac{\rho v_0^2}{2} = p_{атм} + \frac{\rho v^2}{2}$$
$$v = \sqrt{2gh + v_0^2}$$



Где v-скорость струи над уровнем диска, h-длина струи, ρ -плотность воды.

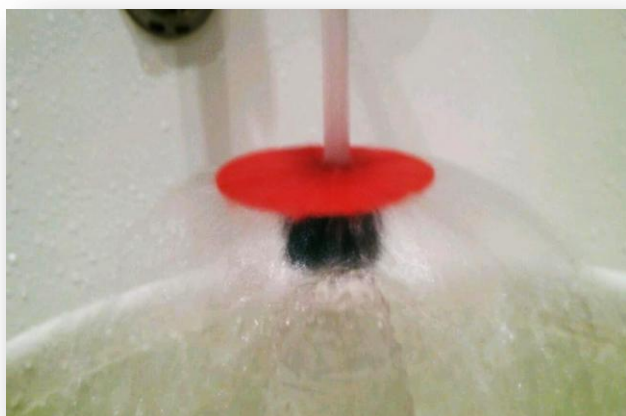
Из уравнения неразрывности:

$$S_0 v_0 = S v$$

$$\frac{\pi d_0^2 v_0}{4} = \frac{\pi d^2 v}{4}$$

$$d = \sqrt{\frac{d_0^2 v_0}{v}}$$

Где S -площадь сечения струи над уровнем диска, d -диаметр сечения струи над уровнем диска.



VII. Практическая часть. Первые опыты по получению купола

Для достижения цели (получить гладкий купол) потребовалось выполнить множество опытов. В результате выяснилось, что диаметр не должен превышать более 8-10 см., так как скорость струи увеличить до нужной скорости было невозможно.

По нашим предположениям, образование купола зависит также от смачивания. Смачивание также влияет на форму купола. Если жидкость смачивает диск, то даже при достаточно больших для жидких частиц скоростях, вода будет стекать с диска, не образуя колокола. При смачивании силы притяжения между молекулами воды слабее, нежели между молекулами воды и молекулами твердого тела, следовательно, жидкость будет задерживаться на диске, и этой задержки хватит для того, чтобы частицы вылетали с диска с меньшей скоростью, нежели при несмачивании.

Смачивания не происходит, потому что диск сделан из пластмассы. Если мы поместим капельку воду на пластмассу, она не растечется по ней, а останется лежать в форме полусферы (краевой угол будет тупым).

Опыт№1



При данных скоростях мы видим, что при попадании струи на диск наблюдается купол, несомкнутый у стержня. Частицы жидкости, попадая на диск, слетают с

него. Их траектория представляет собой параболу. Находясь на небольшом расстоянии от диска, частицы жидкости образуют сплошной купол, а потом сливаются в струи.

Опыт №2

При данных скоростях мы видим, что при попадании струи на диск наблюдается купол, несомкнутый у стержня. Частицы жидкости, попадая на диск, слетают с него. Их траектория представляет собой параболу. Находясь на небольшом расстоянии от диска, частицы жидкости образуют сплошной купол, а потом сливаются в струи, причём струи воды образуются на меньшем расстоянии от диска, по сравнению с предыдущим опытом.



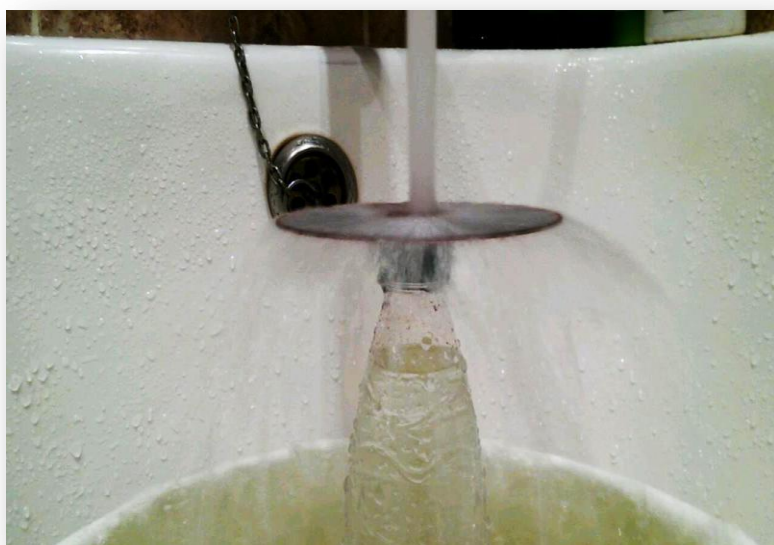
Опыт №3

При повышении скорости, используя тот же диск, мы можем заметить увеличение максимального диаметра купола, что является следствием увеличения скорости, с которой частицы слетают с диска. Парабола, по которой движутся частицы, менее изогнута.



Опыт №4

В этом опыте мы взяли диск из другого материала и с большим диаметром. Он не смачивается водой. В этом случае сплошного купола почти не образуется, частицы параболично слетают с диска, отношение максимального диаметра купола к диаметру диска значительно меньше.



Опыт № 5

Купол ровный, видна водная плёнка, вода не стекается в струйки.



Таблица полученных параметров

Опыт №	1	2	3	4	5
Диаметр диска(D)	0,07	0,07	0,07	0,12	0,048
Диаметр струи(d_0)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01
Высота	0,23	0,165	0,165	0,23	0,012
Объем	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,00125
Время	6,4	6,1	3	3	27,2
$v_{нач}$	0,25	0,26	0,53	0,53	0,59
v	2,14	1,82	1,88	2,19	1,64
d	0,007	0,008	0,01	0,01	0,01
Образование купола	Образуется небольшой купол, который потом переходит в струйки	Разбрызгивание воды, образуется небольшой «зонтик» с последующим переходом в струи	Очень сильное разбрызгивание жидкости, образования купола почти нет	Образуется небольшой купол с переходом в струйки	Образуется гладкий купол, который смыкается у основания стержня

Ни в одном опыте купола, который был описан в книге «Физический фейерверк», не наблюдалось, потому как:

- Скорость частиц велика, частицы слетают с диска, не образуя купол
- Слишком большой диаметр диска. Купол образуется при меньших (1-4 см) диаметрах диска

VIII. Исследование поведения струи при разных диаметрах диска.

Условия:

- Скорость струи неизменна; Течение ламинарное;
- Жидкость (вода) смачивает поверхность диска.

Опыт №1

Диаметр диска(D) = 1.7 м



Опыт № 2

$D = 2.8 \text{ м}$



Опыт № 3

$D = 3.8 \text{ м}$



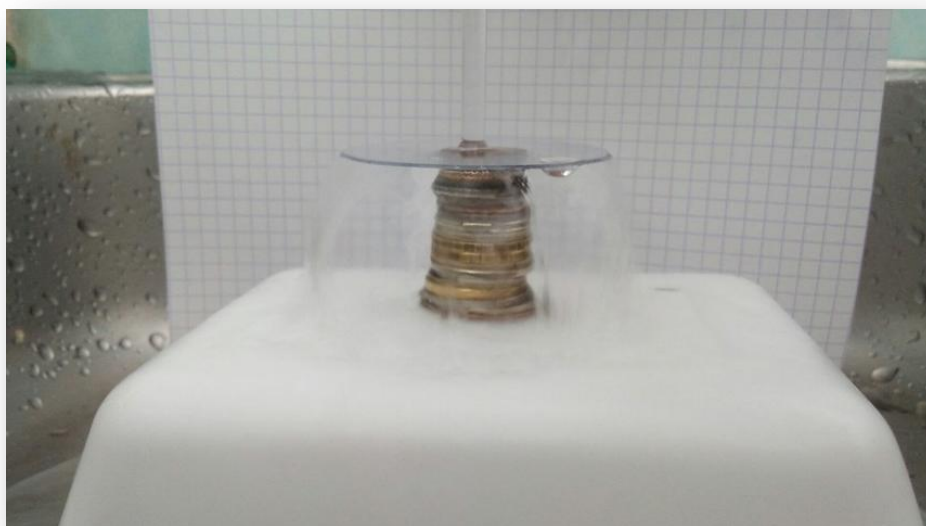
Опыт №4

$D = 4.8 \text{ м}$



Опыт № 5

$D = 5.5 \text{ м}$



Вывод:

При одинаковых условиях и разных диаметрах мы наблюдаем такое явление: чем меньше диаметр диска, тем больше купол; чем меньше диаметр диска, тем меньше вероятность того, что купол начнёт собираться в струйки.

Также в данном опыте мы заметили, фотографии, сделанные со вспышкой, лучше демонстрируют суть процессов. Также при съемке водяного колокола можно заметить, что он несимметричен. Скорее всего, это связано со снижением скорости из-за сопротивления воздуха. Оказалось, что эффекты, которые оказывает воздух на водяной купол, весьма существенны и влияют на значения, которые мы получаем в расчетах.

IX. Исследование поведения струи при изменении температуры

Как известно, с увеличением температуры интенсивность межмолекулярного взаимодействия уменьшается, поэтому снижается и поверхностное натяжение жидкостей. Вдали от критической температуры поверхностное натяжение уменьшается прямо пропорционально росту температуры.

$$\sigma = \sigma_0 - \alpha(T - T_0),$$

Условия:

- Скорость струи неизменна;
- Жидкость (вода) смачивает поверхность диска;

Опыт № 1

$$T = 4 \pm 1 (C^{\circ})$$

Мы видим, что при данной температуре воды образовался ровный купол, замыкающийся на поверхности бутылки. Купол небольшой. Нетрудно заметить, что с обеих сторон расстояние на клетчатой бумаге равно 3 см. Коэффициент поверхностного натяжения при данной температуре равен $7.5 \cdot 10^{-2}$ (Н/м) (Приложение 1).



Опыт № 2

$$T = 22 \pm 1 (C^{\circ})$$

При данной температуре воды купол увеличился в объёме. Явно видно увеличение наибольшего диаметра купола(меньшая сила стремится сжать купол) .Что подтверждает, что поверхностное натяжение уменьшилось. Коэффициент поверхностного натяжения при данной температуре равен $7.3 \cdot 10^{-2} (Н/м)$ (Приложение 1). Уже при небольших изменениях коэффициента поверхностного натяжения заметны изменения в форме купола.



Опыт № 3

Температура (T) = 50 ± 1 (C°)

Купол при данной температуре воды уже не соприкасается с бутылкой. Наибольший диаметр купола равен длине средней отметки. Можно говорить о том, что, отделяясь от купола, вода перетекает в струйки, которые падают вертикально, тогда как при меньших температурах такого не происходило.



Вывод:

При одинаковых условиях и разной температуре мы можем заметить такое явление: чем меньше температура, тем купол более гладкий, без турбулентных явлений. Это подтверждает, что с повышением температуры силы межмолекулярного взаимодействия уменьшаются, снижается и сила поверхностного натяжения. Вследствие этого, при высокой температуре купол собирается в струйки.

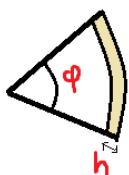
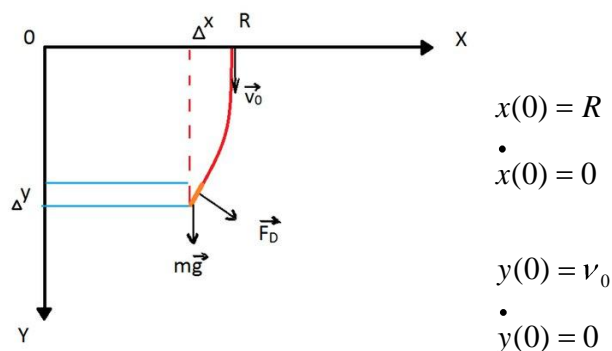
X. Сравнение теоретических данных с практическими.

Любая теория должна быть подтверждена опытом, и любой опыт должен быть обоснован с помощью теории.

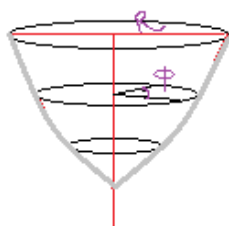
В этом разделе требуется доказать, что теоретический график купола соответствует проекции практического купола. Вместо диска использован колпак с шарообразной поверхностью.

A. Построение теоретического графика

Схематичный (предполагаемый) график стекания воды с краев колпака.



(h- толщина плёнки, стенки струи)



$$\Delta l = x \cdot \Delta \varphi$$

$$\Delta V = x \cdot \Delta \varphi \cdot h \cdot \Delta y$$

$$\Delta m = \rho \cdot \Delta V = \rho \cdot x \cdot \Delta \varphi \cdot h \cdot \Delta y$$

$F_D = \frac{2\sigma}{x} \cdot \Delta S = \frac{2\sigma}{x} \cdot \Delta l \cdot \Delta y = \frac{2\sigma}{x} \cdot \Delta y \cdot x \cdot \Delta \varphi$, где X - радиус кривизны цилиндрической поверхности

-пренебрегаем всеми силами, действующими со стороны других частичек;

-угол, под которым направлена сила давления, невелик, поэтому считаем ее горизонтальной;

Запишем второй закон Ньютона для жидкой частицы:

$$m \cdot \vec{a} = \vec{F}_D + m\vec{g}$$

$$y: m \cdot a_y = m \cdot g$$

$$x: m \cdot a_x = F_D$$

$$m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} = m \cdot g$$

$$\rho \cdot x \cdot \Delta \varphi \cdot h \cdot \Delta y \frac{d^2 x}{dt^2} = -x \cdot \Delta \varphi \cdot \Delta y \cdot \frac{2\sigma}{x}$$

$$\rho \cdot h \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{2\sigma}{x}$$

$$\frac{dv_x}{dt} = g \Rightarrow v_x = v_0 + gt \Rightarrow y = v_0 t + \frac{gt^2}{2}$$

$$v_x = \sqrt{v_0^2 + 2gx}$$

Нахождение толщины стенки струи (h)

Из уравнения неразрывности:

$$S_0 \cdot v_0 = S \cdot v$$

$$S_0 = 2\pi R h$$

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2gy}$$

$$2\pi R_0 h_0 v_0 = 2\pi x h \sqrt{v_0^2 + 2gy}$$

$$h = h_0 \frac{v_0 R}{x \cdot \sqrt{v_0^2 + 2gy}}$$

$$\frac{d^2t}{dt^2} = -\frac{2\sigma}{\rho x h}$$

1) Зависимость скорости от времени

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{-2\sigma(v_0 + gt)}{\rho h_0 v_0 R}$$

$$v_x = -\frac{2\sigma}{\rho h_0 v_0 R} \cdot \left(v_0 t + \frac{gt^2}{2} \right)$$

2) Зависимость координаты от времени

$$\frac{dx}{dt} = \frac{-2\sigma}{\rho h_0 v_0 R} \cdot \left(v_0 t + \frac{gt^2}{2} \right)$$

$$x = \frac{-2\sigma}{\rho h_0 v_0 R} \cdot \left(\frac{v_0 t^2}{2} + \frac{gt^3}{6} \right) + R$$

По полученным данным был построен график с помощью спец. программы на Delphi

В. Получение данных практическим путём



Необходимо было измерить основные параметры, по которым был бы построен теоретический график. Это радиус колпака и начальная скорость воды, которая

стекает с краев колпака. Вычисления скорости струи были рассмотрены в пункте «Параметры, от которых зависит образование купола».

Таким образом

T (время) = 7.50 ± 0.20 с; V (объём емкости) = 0.0005 м^3 ; d (диаметр сечения крана) = 0.015 м;

$h = 0.155 \text{ м} \Rightarrow v = 1.78 \text{ м/с}$

R (радиус колпака) = 0.02 м

С. Построение теоретического графика с полученными параметрами и сравнение его с практическим



По полученным параметрам был построен график и наложен на фотографию купола. Обязательное условие: оси и радиус графика и купола на фотографии совпадают.

График и образующая купола совпадают.

Таким образом, была выведена зависимость координаты и скорости от времени для частиц, стекающих с колпака. Была разработана программа для построения графика зависимости координат.

XI. Заключение

Проведя данную работу, мы изучили и описали влияние различных факторов на форму купола, а именно: изменение размера диска, на который падает струя, материала, из которого он изготовлен, и температуры воды. Получили соответствующие зависимости. Экспериментально пронаблюдали явление сжатия водяного купола и его появление при определённых скоростях жидких частиц, падающих на диск, и диаметре диска.

Тем самым, поставленная цель, а именно исследовать и описать влияние различных факторов на форму купола, достигнута.

ХII. Литература

1. Физика. Молекулярная физика. Термодинамика. 10 класс. Мякишев Г.Я., Синяков А.З. 12-е изд., стереотип. - М.: 2010. - 352 с. (стр.238 - 271);
2. Физический фейерверк, Дж.Уокер: - 2 изд. Пер. с англ./Под ред. И. Ш. Слободецкого. – М.:Мир,1988. – 298 с. (стр.110 – 111, ст.4.114);
3. The Dynamics of Water Bells Eleanor C. Button

XIII. Приложение 1.

[List Microsoft Office ExcelKP.xlsx](#)

Приложение 2.

Температура, (°C)	Поверхностное натяжение, σ , 10^{-2} (Н/м)
0	7.56
5	7.49
10	7.42
20	7.28
30	7.12
40	6.96
50	6.79
60	6.62
70	6.44
80	6.26
90	6.08
100	5.89