

Оглавление

Введение	1
Цель работы.....	1
1. Кумулятивный эффект	1
1.1. История открытия.....	1
1.2. Применение кумулятивного эффекта	2
1.3. Кумулятивная струя.	4
2. Исследование кумулятивной струи в условиях школьной лаборатории.	5
2.1. Кумулятивная струя из упавшей пробирки.	5
2.2. Зависимость высоты кумулятивной струи от скорости движения жидкости. ...	7
2.3. Создание математической модели зависимости кумулятивной струи от скорости движения жидкости.....	9
3. Выводы.....	9
3.1. Условия возникновения кумулятивной струи.	9
3.2. Зависимость высоты кумулятивной струи от скорости движения жидкости. ...	9
Литература.....	11

Введение

Наверное, нет такого человека, которому никогда не приходилось видеть как при падении редких капель дождя в лужу образуются всплески воды. Это маленькие кумулятивные струи.

Термин кумуляция происходит от латинского *cumulatio* — «скопление» или *cumulo* — «накапливаю» и дословно означает увеличение или усиление какого-либо эффекта за счет сложения или накопления нескольких однородных с ним эффектов.

Когда физики говорят о кумуляции, они обычно подразумевают кратковременные процессы, например взрывы, и под кумуляцией понимают усиление в определенном месте или направлении действия этих процессов.

Понятно, что кумулятивные струи жидкости могут появляться не только при взрывах. Для их образования достаточно создать такие условия, при которых плотность кинетической энергии движущейся жидкости быстро возрастает в сравнительно небольшом объеме. Если этот объем не сферически-симметричен, то обязательно возникнет кумулятивная струя.

Свою работу я решил посвятить исследованию кумулятивного эффекта.

Цель работы

Моя работа посвящена экспериментальному изучению кумулятивной струи

1. Кумулятивный эффект

Кумулятивный эффект, эффект Манро — усиление действия взрыва путём его концентрации в заданном направлении, достигаемое применением заряда с выемкой, противоположной местонахождению детонатора и обращённой в сторону поражаемого объекта. Кумулятивная выемка обычно конической формы, покрывается металлической облицовкой, толщина которой может варьироваться от долей миллиметра до нескольких миллиметров.

1.1. История открытия.

В 1792 году горный инженер Франц фон Баадер высказал предположение, что энергию взрыва можно сконцентрировать на небольшой площади, используя полый заряд. Однако в своих экспериментах фон Баадер использовал чёрный порох, который не может формировать необходимую детонационную волну. Впервые продемонстрировать эффект

применения полого заряда удалось лишь с изобретением высокобризантных взрывчатых веществ. Это сделал в 1883 году изобретатель Макс фон Фёрстер (*Max von Foerster*).

В Советском Союзе в 1925—1926 годах изучением зарядов взрывчатых веществ с выемкой занимался профессор М. Я. Сухаревский.

Рентгено-импульсная съемка процесса, осуществленная в 1939 — начале 1940-х годов в лабораториях Германии, США и Великобритании, позволила существенно уточнить принципы действия кумулятивного заряда (традиционная фотосъемка невозможна из-за вспышек пламени и большого количества дыма при детонации).

Кумулятивные боеприпасы впервые были применены в боевых условиях 10 мая 1940 г. при штурме форта Эбен-Эмаэль (Бельгия). Тогда для подрыва укреплений диверсионным отрядом использовались переносные заряды в виде полусфер весом 12,5 и 50 кг.

Одним из неприятных сюрпризов лета 1941 года для танкистов РККА стало применение войсками Германии кумулятивных снарядов и гранат. На подбитых танках обнаруживались пробоины с оплавленными краями, поэтому снаряды получили название «бронепрожигающих». 23 мая 1942 года на Софринском полигоне были проведены испытания снаряда к 76-мм полковой пушке, разработанного НИИ-6 на основе трофейного немецкого снаряда. По результатам испытаний 27 мая 1942 года первый советский кумулятивный снаряд БП-353А принят на вооружение.

В 1950-е годы был достигнут огромный прогресс в понимании принципов формирования кумулятивной струи. Предложены методы усовершенствования кумулятивных зарядов пассивными вкладышами (линзами), определены оптимальные формы кумулятивных воронок, применена ступенчатая облицовка конуса для компенсации вращения снаряда, разработаны специальные составы взрывчатых веществ. Многие из обнаруженных в те далекие годы явлений изучаются и до настоящего времени.

1.2. Применение кумулятивного эффекта

Кумулятивный эффект широко используется в военном деле.

Несмотря на относительно слабое заброневое действие, кумулятивная граната при попадании в башню, как правило, убивает одного или более членов экипажа бронемашины, может вывести из строя вооружение, подорвать боекомплект. Попадание в моторное отделение делало машину неподвижной мишенью, а если на пути кумулятивной струи встречались топливопроводы, происходило воспламенение.

Основной поражающий фактор кумулятивного заряда - это отрывающиеся осколки и капли брони. При попадании на боекомплект танка осколков и капель от пробитой брони возможно его воспламенение и детонация с разрушением бронемашины. Если кумулятивная струя и капли брони не поражают людей и пожаро-взрывоопасное оборудование танка, то в целом прямое попадание даже мощного кумулятивного заряда может не вывести из строя танк.

По обзору исследований кумулятивных боеприпасов поражение защищённой цели достигается действием короткой кумулятивной струи небольшого диаметра, но за счет этого создающего давление в несколько тонн на квадратный сантиметр, что превышает предел текучести металлов и пробивает небольшое отверстие около 80 мм в броне. Весь наблюдаемый визуально взрыв кумулятивного заряда происходит до брони и избыточное давление и температура не могут проникнуть через небольшое отверстие и не являются основными поражающими факторами. Устанавливаемые внутри танков датчики давления и температуры не фиксируют существенного фугасного или термического воздействия после пробития брони кумулятивной струей. Основной поражающий фактор кумулятивного заряда - это отрывающиеся осколки и капли брони. Попадание в моторное отделение делало машину неподвижной мишенью, а если на пути кумулятивной струи встречались топливопроводы, происходило воспламенение. Если кумулятивная струя и капли брони не поражают людей и пожаро-/взрывоопасное оборудование танка, то в целом прямое попадание даже мощного кумулятивного заряда может не вывести из строя бронемашину.

Кумулятивный эффект используется не только в военных, но и в мирных целях. В первую очередь здесь следует отметить гигантские направленные взрывы, в считанные секунды создающие плотины и иные сооружения. В скальных породах и мерзлых грунтах кумулятивными зарядами при необходимости пробивают скважины, предназначенные для закладки основного заряда с целью последующего крупного взрыва, для установки различного рода опор, фундаментов и т. д. Кумулятивный эффект применяется для резки прочных листов металла большой толщины, для обжатия металлических листов и труб, для упрочнения металла. В промышленности довольно широко используется сварка взрывом, имеющая ряд преимуществ перед обычными видами сварки. Наконец, нельзя не упомянуть и о применении кумулятивного эффекта в научных исследованиях. Например, явление кумуляции используется для метания частиц вещества со скоростями, достигающими 100 км/с, для создания сверхмощных магнитных полей и т. д.

Все это говорит о том, что с кумулятивным эффектом связано немало профессий и специальностей, значит, возможно, вы еще встретитесь с ним в своей жизни.

1.3. Кумулятивная струя.

Понятно, что кумулятивные струи жидкости могут появляться не только при взрывах. Для их образования достаточно создать такие условия, при которых плотность кинетической энергии движущейся жидкости быстро возрастает в сравнительно небольшом объеме. Если этот объем не сферически-симметричен, то обязательно возникнет кумулятивная струя.

В широкий сосуд глубиной не менее 10 см наливаем воду. Стекланную воронку возьмем в руку, перекрываем отверстие ее трубки указательным пальцем и опускаем воронку конической частью в воду так, чтобы ее трубка была расположена вертикально. Вода не сможет зайти в воронку, так как этому будет препятствовать находящийся внутри нее воздух. Теперь резко убираем палец, открыв отверстие трубки. Вода быстро войдет в воронку и выплеснется из ее трубки в виде кумулятивной струи.

Очевидно, результат описанного опыта объясняется набеганием потока воды на внутреннюю коническую поверхность воронки. Разумеется, хороший результат получается отнюдь не со всякой воронкой. Помимо размеров и формы воронки результат опыта существенно зависит и от того, насколько глубоко погружена воронка в воду и какая часть объема конической емкости воронки предварительно (перед открыванием отверстия трубки) заполнена водой.

Есть и иной вариант постановки опыта. Он заключается в следующем. Двумя пальцами берем воронку за трубку, погружаем воронку в воду так, чтобы область перехода от конуса к трубке оказалась на 2—4 см выше поверхности воды, и затем резким, но коротким движением кисти руки вниз быстро затапливаем всю коническую часть воронки. При этом образуется кумулятивная струя, которая бьет вверх на высоту 2—4 метра!

Теперь становится совершенно очевидным, что для получения цилиндрической кумулятивной струи нет необходимости использовать воронку или иное твердое тело с внутренней поверхностью вращения. Задача может быть решена, если тем или иным способом в поверхности жидкости сделать углубление, например, коническое или сферическое, и затем быстро захлопнуть его так, чтобы скорости частиц жидкости были направлены перпендикулярно поверхности углубления. ^[2]

Теоретическая пробивная способность кумулятивных снарядов пропорциональна длине кумулятивной струи и квадратному корню отношения плотности облицовки воронки к плотности брони. Практическая глубина проникновения кумулятивной струи в

монолитную броню у существующих боеприпасов варьируется в диапазоне от 1,5 до 4 калибров.

При схлопывании конической оболочки скорости отдельных частей струи оказываются различными, и струя в полёте растягивается. Поэтому небольшое увеличение промежутка между зарядом и мишенью увеличивает глубину пробивания за счёт удлинения струи. Однако при значительных расстояниях между зарядом и мишенью непрерывность струи нарушается что снижает бронебойный эффект. Наибольший эффект достигается на так называемом «фокусном расстоянии», на котором струя максимально растянута, но ещё не разорвана на отдельные фрагменты. Для выдерживания этой дистанции используют различные типы наконечников соответствующей длины.

При перемещении в твёрдой среде градиентно разорванная кумулятивная струя самоцентрируется, а диаметр трека по мере удаления от точки фокуса уменьшается. При перемещении разорванной на фрагменты кумулятивной струи в жидкостях и газах — каждый фрагмент перемещается по собственной траектории, а диаметр трека по мере удаления от точки фокуса увеличивается. Этим объясняется резкое снижение пробивной способности высоко градиентных кумулятивных струй при использовании противокумулятивных экранов.

Использование заряда с кумулятивной выемкой без металлической облицовки снижает кумулятивный эффект, так как вместо металлической струи действует струя газообразных продуктов взрыва; однако при этом достигается значительно более сильное заброневое действие.

2. Исследование кумулятивной струи в условиях школьной лаборатории.

2.1. Кумулятивная струя из упавшей пробирки.

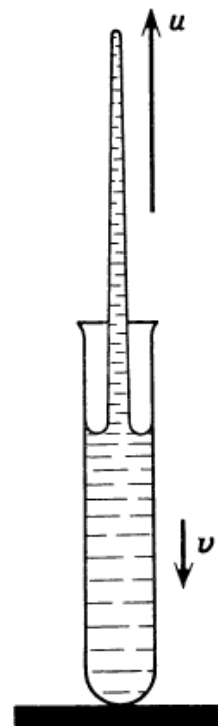
Известный специалист в области физики и техники взрыва профессор Г. И. Покровский предложил простой и изящный опыт, демонстрирующий образование кумулятивной струи. Чтобы поставить этот опыт, требуются лишь стеклянная пробирка и вода.

Нальем воду в чистую стеклянную пробирку внутренним диаметром 15 мм и длиной 150 мм. Поскольку вода смачивает стекло, поверхность воды в пробирке образует вогнутый мениск. Таким образом, мы уже имеем углубление в поверхности жидкости. Осталось как-то заставить схлопнуться это углубление. Самый простой способ заключается в следующем. Возьмем пробирку с водой правой рукой за ее край, поднимем

пробирку над твердой поверхностью стола на высоту 5—10 см и, убедившись, что пробирка висит в пальцах вертикально, отпустим ее. В момент удара пробирки возникает тонкая кумулятивная струя, поднимающаяся на высоту, значительно превышающую ту, с которой падала пробирка! Например, если пробирка с водой падает с высоты 50 мм на поверхность толстой мраморной плиты, кумулятивная струя имеет длину порядка метра.

При ударе о поверхность стола пробирка и находящаяся в ней жидкость почти мгновенно останавливаются. При действии таких отрицательных ускорений жидкость становится как бы очень тяжелой и ее поверхность, искривленная капиллярными силами, выравнивается. Края опускаются вниз, а средняя часть немного поднимается. Путем простого расчета можно установить следующее. Пусть край поверхности жидкости в пробирке расположен выше средней части этой поверхности на величину d . Пусть высота падения пробирки h и путь ее торможения при ударе равен Ah . Тогда высота, на которую может подняться возникающая при ударе струйка жидкости, оказывается равной

$$l = \frac{d \cdot h}{\Delta h}$$



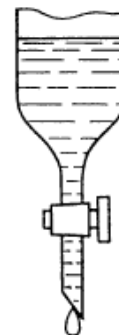
Если, например, $d = 0,1$ см, $h = 10$ см, $\Delta h = 10^{-3}$ см, то $l = 10$ м. Фактически струйка на такую высоту подняться не может, потому что этому препятствует сопротивление воздуха. Однако и в воздухе подъем струйки может составить несколько десятков сантиметров и поэтому описываемое явление проявляется очень ярко.

Выясним, насколько существенно смачивание водой стенок пробирки. Для этого поместим внутрь стеклянной пробирки небольшой кусочек парафина. Нагреем пробирку на пламени сухого горючего или спиртовки так, чтобы парафин расплавился. Вращая удаленную из пламени пробирку вокруг ее оси, равномерно покроем внутреннюю поверхность пробирки тонким слоем парафина. После затвердевания парафина и охлаждения пробирки нальем в нее воду и повторим опыт Покровского. Мы обнаружили, что в этом случае кумулятивная струя не образуется! Следовательно, смачиваемость стенок пробирки жидкостью является существенным условием получения кумулятивной струи.

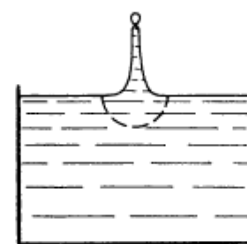
2.2. Зависимость высоты кумулятивной струи от скорости движения жидкости.

Наверное, нет такого человека, которому никогда не приходилось видеть, как при падении редких капель дождя в лужу образуются всплески воды. Это маленькие кумулятивные струи. Чтобы убедиться в сказанном, можно проделать следующую серию простых опытов.

На стол поставим стеклянный стакан с водой и над ним укрепим капельницу, дающую капли воды диаметром около 3 мм. Мы наблюдаем, что всякий раз, когда капля долетает до поверхности воды в стакане и исчезает, вслед за этим над водой появляется кумулятивная струя. Если посмотреть на стакан сбоку, то хорошо видно, что в момент удара капли в верхнем слое воды образуется полусферическое углубление. Схлопывание именно этого углубления и приводит к возникновению кумулятивной струи.



Наблюдения показали, что следующие одна за другой капли дают различные по высоте кумулятивные струи. Почему? Капельница, очевидно, «вырабатывает» капли равной массы, имеющие одинаковые начальные скорости, причем эти капли проходят до встречи с поверхностью воды равные расстояния. Мы убедились, что за обнаруженный эффект ответственны волны на поверхности воды в стакане. Первая капля, упавшая в воду, возбуждает расходящуюся от места падения волну, которая доходит до стенки стакана и отражается назад.



Интерференция падающей и отраженной волн приводит к тому, что на поверхности воды на некоторое время устанавливается стоячая волна.

Результат опыта по образованию кумулятивной струи, безусловно, зависит от того, упадет ли вторая капля во впадину или в горб стоячей волны. Чтобы исключить этот нежелательный эффект, нужно либо увеличить промежуток времени между двумя следующими друг за другом каплями, либо заменить стакан с водой на сосуд большего диаметра, что мы и сделали во второй серии опытов. Добившись, чтобы каждая капля падала на спокойную поверхность воды, мы убедились, что капли дают практически одинаковые по форме и высоте кумулятивные струи.

Исследуем зависимость получающейся в рассматриваемых опытах кумулятивной струи от скорости порождающей ее капли. Если изменять расстояние от поверхности воды в сосуде до капельницы в пределах от 0 до 1 м, то скорость капли в момент сопри-

косновения ее с водой будет увеличиваться от $v = 0$ до $v = \sqrt{2gh}$ м/с, где g — ускорение свободного падения, h — высота, с которой упала капля (сопротивлением воздуха мы пренебрегаем).

Постепенно поднимая капельницу, мы обнаружили, что уже начиная с высоты 1—2 см капли дают углубления, но кумулятивные струи не формируются. Объясняется это тем, что углубления в поверхности воды захлопываются недостаточно быстро.

При подъеме капельницы на высоту около 5 см начинают появляться небольшие тонкие кумулятивные струи. Дальнейший подъем капельницы над поверхностью воды приводит к росту образующихся кумулятивных струй по высоте. Однако начиная с определенного расстояния между поверхностью воды в сосуде и капельницей рост кумулятивных струй в высоту прекращается, зато начинает увеличиваться их диаметр: получаются толстые всплески воды, на конце которых обязательно вырастает капля. При последующем подъеме капельницы упавшие капли вначале порождают толстые всплески и вслед за ними появляются тонкие кумулятивные струи, нередко более высокие, чем первоначальный всплеск.

Если в этих условиях вы посмотрите внутрь воды через прозрачную стенку сосуда, то обнаружите, что падение капли приводит к образованию полусферического углубления, которое, схлопываясь, дает толстую струю, а она уже вновь продавлиывает поверхность воды, создавая вытянутое вниз углубление, при схлопывании которого и получается более тонкая струя. Все это происходит настолько быстро, что для уверенной регистрации указанных стадий процесса нужно проделать по крайней мере несколько наблюдений. Наконец, если капли падают в воду с высоты 2,5—3 м, то они вообще не дают кумулятивных струй: на поверхности воды вместо углублений получают какие-то пузыри.

В ходе экспериментов мы устанавливали капельницу на различную высоту с шагом 5 см и с помощью видеосъемки измеряли высоту получившейся кумулятивной струи. Результаты опытов были сведены в таблицу и проанализированы с помощью программы Microsoft Excel.

Заменяв падающие капли воды на металлический шарик диаметром 8 мм и весом 20 г. мы провели еще одну серию опытов.

Полученные данные, графики и их корреляция приведены в приложении.

Эксперимент и теоретическая оценка показывают, что капля воды радиусом 2 мм, упавшая в воду с высоты 200 мм, порождает струю высотой $l \approx 40$ мм. Наибольшая плотность энергии в такой струе $W = \rho gl \approx 392$ Дж/м³, т. е. примерно в 17 раз больше, чем плотность энергии в жидкости, давшей струю. Таким образом, при схлопывании

углубления в поверхности жидкости действительно происходит увеличение плотности энергии в определенном направлении, т. е. имеет место кумулятивный эффект.

2.3. Создание математической модели зависимости кумулятивной струи от скорости движения жидкости.

Для анализа полученных данных и получения математической модели используем возможности программы Microsoft Excel. Занесем полученные данные в таблицу и рассчитаем скорость движения капли в зависимости от высоты падения:

$$v = \sqrt{2hg}, \text{ где } v - \text{ скорость движения;}$$

H – высота падения;

G – ускорение свободного падения.

На основании полученных данных строим диаграмму зависимости высоты кумулятивной струи h от скорости движения жидкости v . Наложим на полученный график линию тренда и получим примерную формулу. Анализ графика показывает, что наиболее вероятной будет являться логарифмическая зависимость:

$$h = 0,037 \ln(v) + 0,046.$$

Прогнозируя линию тренда на 5 периодов, можно предположить, что примерно с высоты падения 1 м. высота кумулятивной струи практически не будет меняться. Это хорошо согласуется с полученными экспериментальными данными и литературными источниками.

3. Выводы.

3.1. Условия возникновения кумулятивной струи.

Проведенные эксперименты показали, что задача получения кумулятивной струи может быть решена, если тем или иным способом в поверхности жидкости сделать углубление, например, коническое или сферическое, и затем быстро захлопнуть его так, чтобы скорости частиц жидкости были направлены перпендикулярно поверхности углубления.

3.2. Зависимость высоты кумулятивной струи от скорости движения жидкости.

Проведенные эксперименты доказали, что при падении капли воды с высоты более 50 мм. возникает кумулятивный эффект. Проведенный анализ позволил получить следующую зависимость высоты кумулятивной струи от скорости движения жидкости:

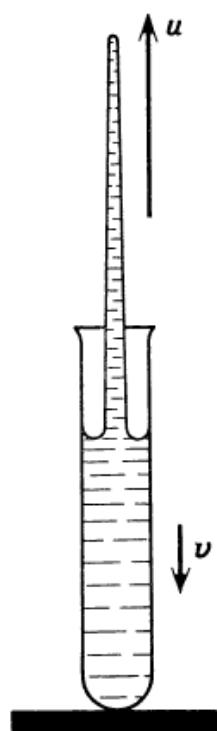
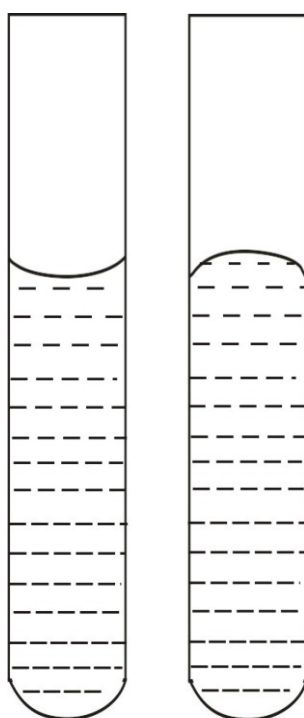
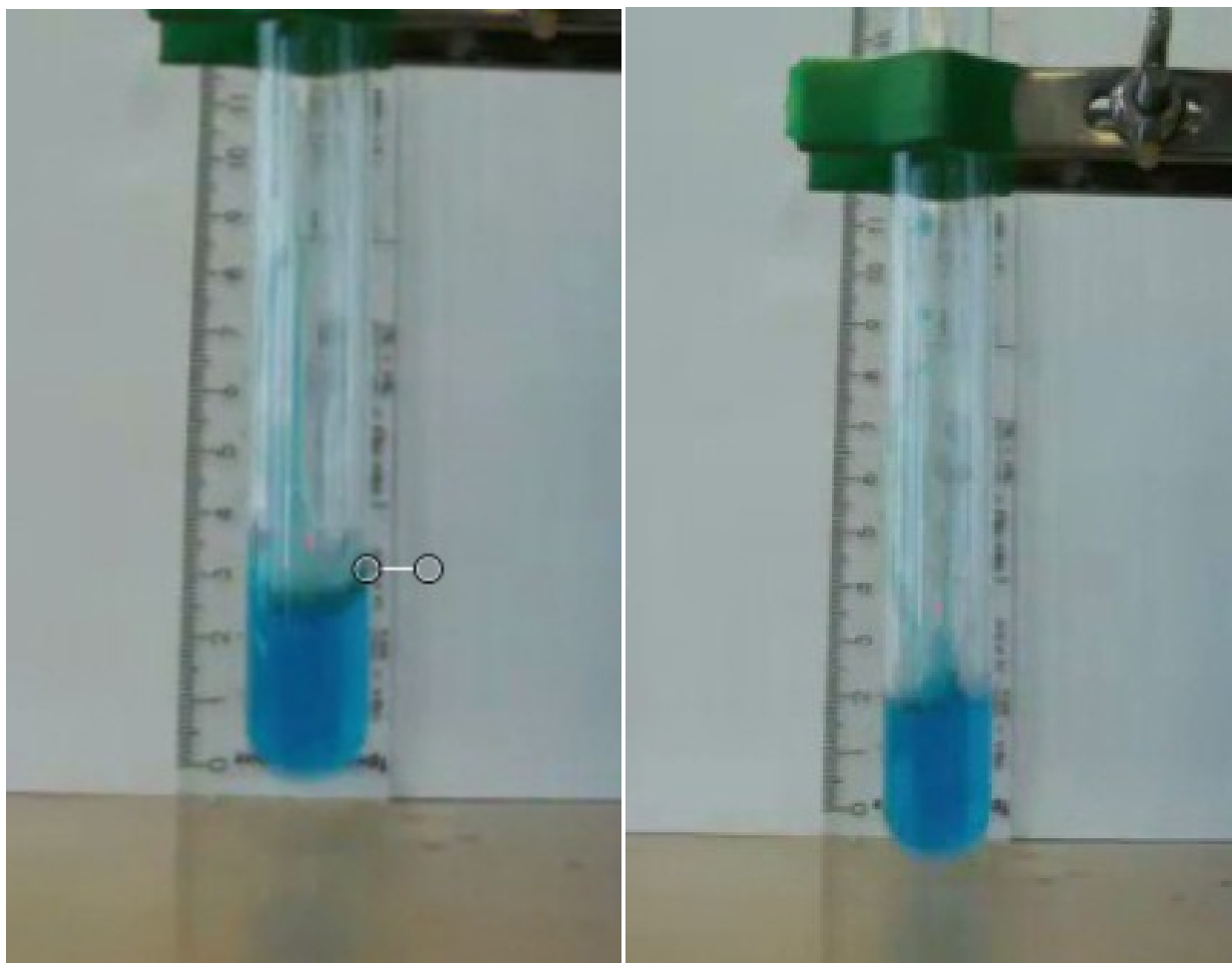
$$h = 0,037\ln(v) + 0,046$$

Литература

1. Детская энциклопедия для среднего и старшего возраста, т.3 Вещество и энергия, – 3-е изд., М.: Педагогика, 1973
2. Уокер Дж. Физический фейерверк: - 2-е изд. Пер.с англ./ Под ред. И.Ш.Слободецкого. – М.: Мир, 1998.
3. Энциклопедический словарь юного физика / Сост.В.А.Чуянов. – 2-е изд., испр. и доп.- М.: Педагогика, 1991. – 336с.
4. 6. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике, М.: Наука, 1979.- 944 с.
5. http://www.chemport.ru/chemical_encyclopedia_article_6291.html статья А. Я. Малкина, Н. Б. Урьева.
6. <http://www.d3o.com> военная энциклопедия
7. <http://www.ai08.org/index.php> технический словарь, вязкоупругие тела
8. <http://www.femto.com.ua> энциклопедия физики и техники внутреннее трение
9. <http://files.school-collection.edu.ru> о реологии, как науки о деформациях и текучести сплошных сред
10. <http://www.highexpert.ru> физические свойства жидкостей
11. <http://dxdy.ru/> научный форум, помощь в некоторых вопросах
12. <http://www.techgidravlika.ru> классификации жидкости

Приложения

1. Кумулятивная струя из упавшей пробирки. (фото, схема опыта)

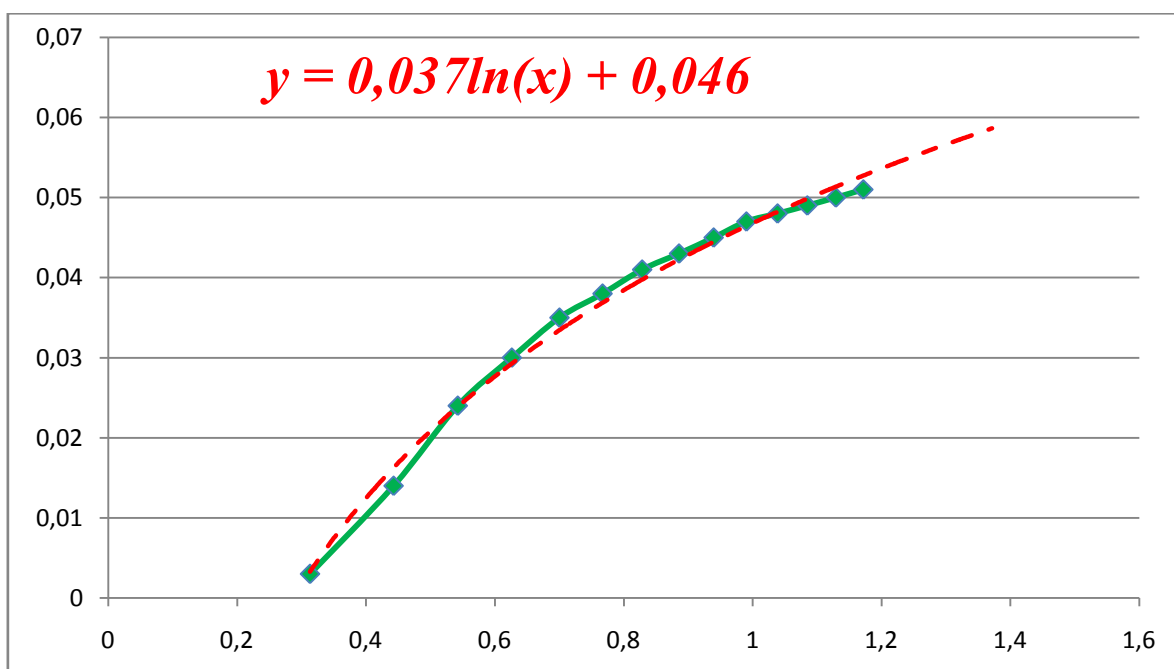


2. Зависимость высоты кумулятивной струи от скорости движения жидкости. (фото, таблица, график, схема опыта)

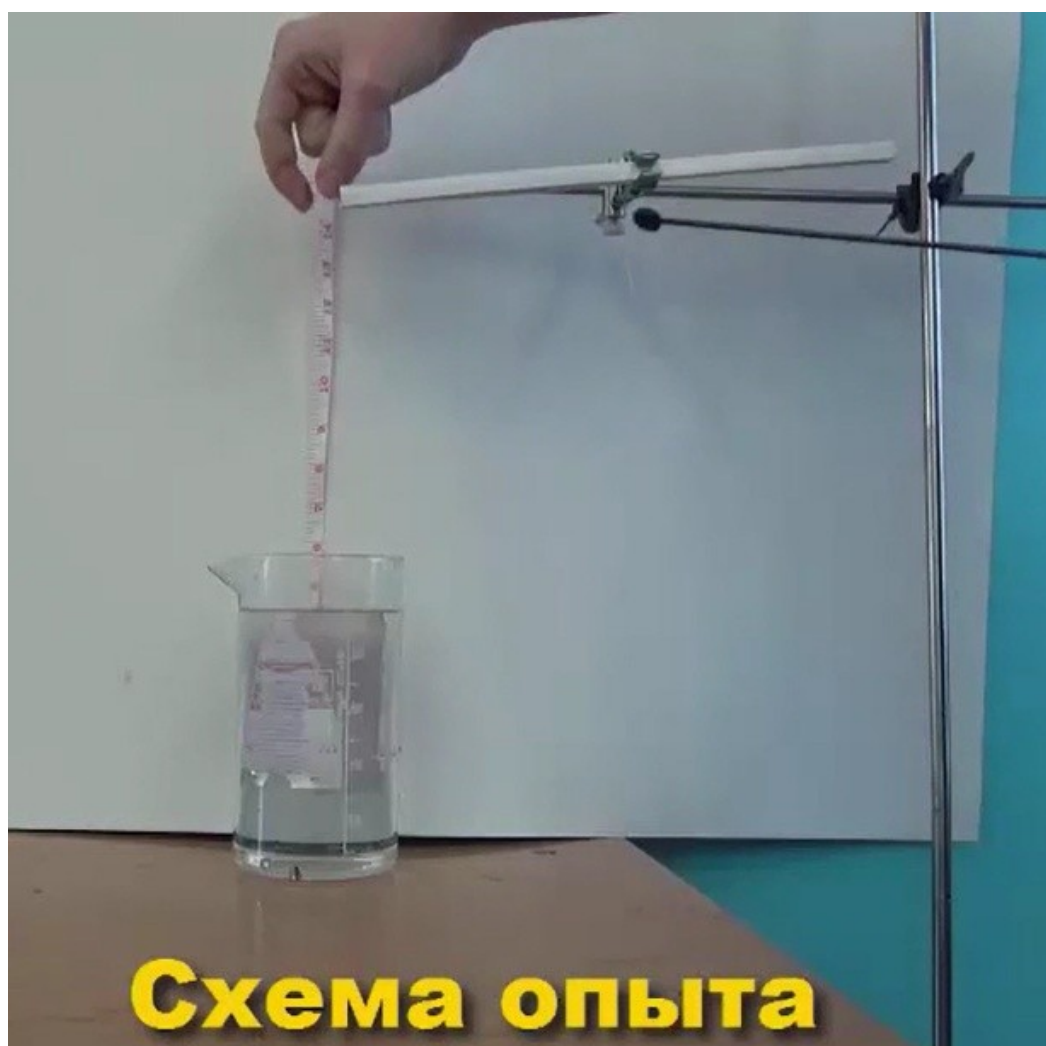
2.1. Опыты с падающей каплей



S	V	h
высота падения капли (см)	скорость падения капли (м/с)	высота кумулятивной струи (м)
5	0,313209195	0,003
10	0,442944692	0,014
15	0,54249424	0,024
20	0,626418391	0,03
25	0,700357052	0,035
30	0,767202711	0,038
35	0,828673639	0,041
40	0,885889384	0,043
45	0,939627586	0,045
50	0,990454441	0,047
55	1,038797382	0,048
60	1,084988479	0,049
65	1,129291813	0,05
70	1,171921499	0,051



2.2. Опыты с шариком.



высота падения шарика (см)	скорость падения шарика (м/с)	высота кумулятивной струи (м)
5	0,3132092	0,05
10	0,44294469	0,17
15	0,54249424	0,325
20	0,62641839	0,42
25	0,70035705	0,45
30	0,76720271	0,49
35	0,82867364	0,51
40	0,88588938	0,56
45	0,93962759	0,6
50	0,99045444	0,65
55	1,03879738	0,68
60	1,08498848	0,73
65	1,12929181	0,74
70	1,1719215	0,76
75	1,213054	0,78

