

Демонстрации и опыты



Майер Валерий Вильгельмович

Доктор педагогических наук,
профессор, заведующий кафедрой
физики и дидактики физики,
декан физического факультета
Глазовского государственного
педагогического института.

Вараксина Екатерина Ивановна

Старший преподаватель
кафедры физики и дидактики
физики Глазовского
государственного
педагогического института.

Удивительные свойства насыщенного пара

В статье представлены учебные экспериментальные исследования некоторых физических свойств насыщенных паров. В основу исследований положены варианты известных опытов: водяной молоток в пробирке, гидродинамический удар в бутылке, фонтан воды в колбе, кавитация при конденсации насыщенного пара в холодной жидкости и определение теплоты конденсации пара.

Каждый из нас непрерывно имеет дело с водяным паром. Физические свойства паров исключительно интересны и широко используются на практике. Поэтому предлагаемые в статье учебные исследования насыщенных паров жидкостей, несомненно, принесут вам пользу.

1. Водяной молоток

В прежние времена в любом приличном кабинете физики обязательно был *водяной молоток* – вытянутый запаянный сосуд из стекла с резервуаром и узким горлышком, в котором находится немного воды и удалён воздух. Поразительно, что при переворачивании сосуда вода свободно проходит через небольшое отверстие горлышка. Если такой сосуд взять в руку и сделать резкое движение сначала вверх, а затем вниз (рис. 1), то вода ударяется о дно сосуда, как твёрдое тело.

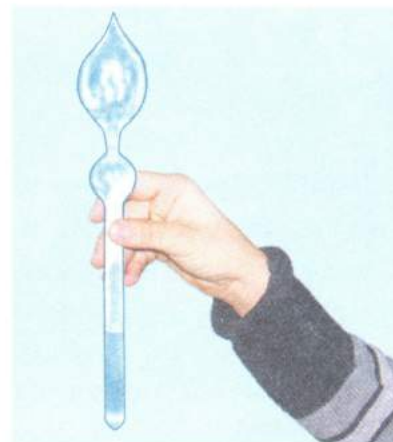


Рис. 1

Объясняется это интересное явление тем, что кроме воды в сосуде имеется лишь насыщенный водяной пар. Как известно, давление насыщенного пара не зависит от его объёма – при уменьшении объёма насыщенный пар просто конденсируется в жидкость.

Чтобы сделать водяной молоток, возьмите стеклянную пробирку внутренним диаметром примерно 20 мм и длиной около 20 см. Подберите к пробирке резиновую пробку. В пробке сделайте отверстие диаметром 4 мм. Из подходящей пластмассы или металла изготовьте коническую затычку, плотно входящую в отверстие пробки. В пробирку на одну треть налейте воду, плотно вставьте в отверстие пробирки резиновую пробку, закрепите пробирку вертикально и спиртовкой вскипятите воду (рис. 2). Выждите несколько минут, пока из отверстия пробки выходит пар, быстро и плотно вставьте в отверстие затычку и сразу же уберите спиртовку.

Пробирку с горячей водой опустите в стакан с холодной водой и подождите до тех пор, пока пробирку не станет возможным держать в руке. Пар в ней частично конденсируется, и давление в пробирке сни-

зится. Это объясняется тем, что давление насыщенного водяного пара при комнатной температуре примерно в 40 раз меньше атмосферного.

Переверните пробирку. Если вы видите всплывающие вверх пузырьки воздуха, значит герметизация не слишком хороша. Нужно проверить, в чём дело, и, устранив возможные течи, повторить описанный выше процесс.

Если в перевернутой вверх дном пробирке не видны всплывающие пузырьки воздуха, значит, водяной молоток у вас получился.

Перед постановкой опыта примите меры безопасности, надев защитные очки. Сам опыт проведите достаточно осторожно: сначала встряхните пробирку не слишком резко. Вы услышите характерный щелчок и почувствуете, как внутри пробирки о её дно ударилось «твёрдое» тело. В самом деле, жидкость слабо сжимаема, и если её форма не меняется, то при взаимодействиях она ведёт себя подобно твёрдому телу.

Слишком резкие движения водяного молотка могут привести к тому, что стекло не выдержит и пробирка разлетится на куски.

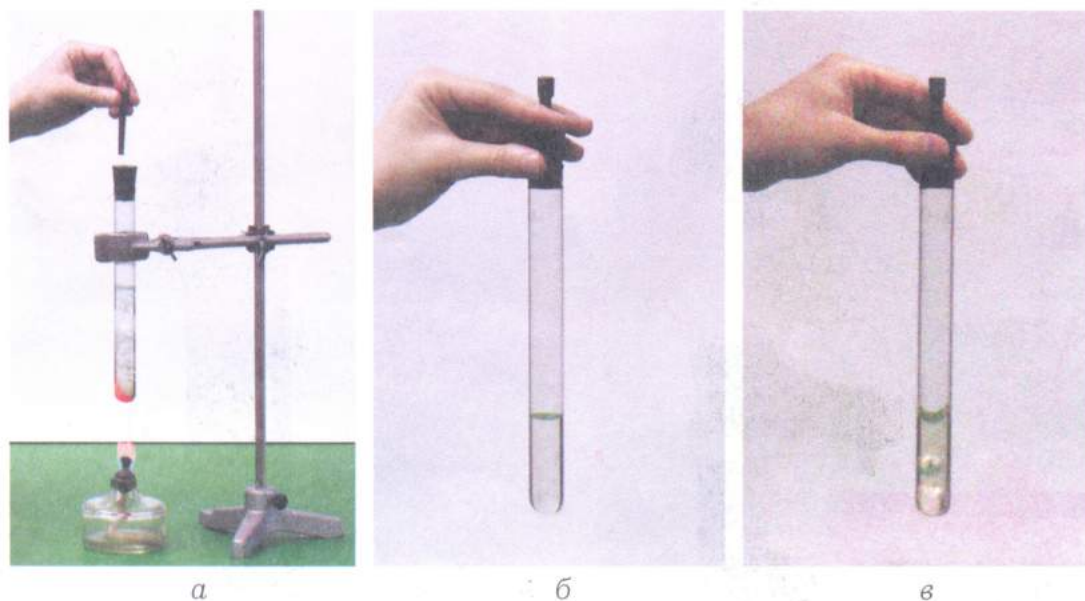


Рис. 2

2. Гидродинамический удар

Фактически в опыте с водяным молотком происходит *гидродинамический удар*. Чтобы осознать разрушающую силу этого явления, можно поставить такой эксперимент.

Приготовьте полулитровую стеклянную бутылку с плавным сужающейся горловой частью, деревянную киянку, матерчатую перчатку и пластиковый тазик. На рабочую поверхность киянки приклейте плотную резиновую накладку толщиной 2–4 мм.

На левую руку наденьте перчатку, в руку за горлышко возьмите бутылку, расположите её над тазиком, в правую руку возьмите молоток и резко, но не слишком сильно, ударьте по горлышку бутылки (рис. 3). При этом бутылка остаётся целой. Этот опыт повторите несколько раз, чтобы твёрдо убедиться, что разбить описанным способом пустую бутылку невозможно.

В бутылку налейте воду так, чтобы до её отверстия оставалось примерно 70 мм, и вновь ударьте по

горлышку молотком, как это описано выше. При этом от бутылки немедленно отлетает дно!

Фотография описанного опыта представлена на рис. 4. Вы видите, что оторвалось дно бутылки и из неё «вывалился» столб воды. Обратите внимание на полусферическую поверхность воды внутри бутылки – именно такую форму имеют поверхности жидкости в цилиндрическом смачиваемом сосуде, находящемся в состоянии невесомости.

Объяснение опыта вполне понятно. В момент удара по горлышку бутылка резко движется вниз, а столб воды в ней в силу инерционности остаётся на месте. Таким образом, на мгновение дно бутылки отрывается от массы воды, и в области разрыва оказывается насыщенный пар. В следующий момент времени атмосферное давление гонит столб воды вниз, он ударяется о дно бутылки как настоящий твёрдый молоток и выламывает это дно.



Рис. 3



Рис. 4

3. Фонтан в колбе

Подберите стеклянную колбу объемом 0,5 л и резиновую пробку, плотно закрывающую отверстие колбы. В пробке сделайте отверстие и вставьте в него стеклянную трубку внутренним диаметром около 3 мм. Желательно, чтобы трубка имела оттянутый конец с отверстием диаметром около 1 мм.

Сухую колбу, закрытую пробкой с трубкой, нагрейте на пламени спиртовки и, перевернув, быстро опустите конец трубки в стакан с водой. Вы увидите, что по трубке вверх поднимается вода, которая небольшим фонтанчиком вяло переливается через верхнее отверстие в колбу.

Объяснение полученного результата не вызовет у вас затруднений: воздух в колбе нагрет спиртовкой, когда трубка опущена в стакан с водой, воздух охлаждается, давление в колбе уменьшается, и атмосферное давление загоняет воду из стакана в колбу.

Чтобы в колбе получился мощный фонтан, в ней должен находиться не нагретый воздух, а нагретый насыщенный водяной пар.

Итак, налейте в колбу немного воды, закройте её резиновой пробкой со стеклянной трубкой и на спиртовке доведите воду до кипения. Подождите некоторое время, чтобы горячий водяной пар вытеснил из колбы как можно больше воздуха. Быстро переверните колбу и опустите отверстие трубки в сосуд с холодной водой.

Вы увидите, что как и в предыдущем опыте, вода поднимается по трубке, причём подъём этот вначале идёт довольно медленно. Но как только в колбе окажутся первые капли холодной воды, ситуация резко меняется: из трубки начинает бить мощный фонтан так, что вода постепенно заполняет почти всю колбу (рис. 5)!

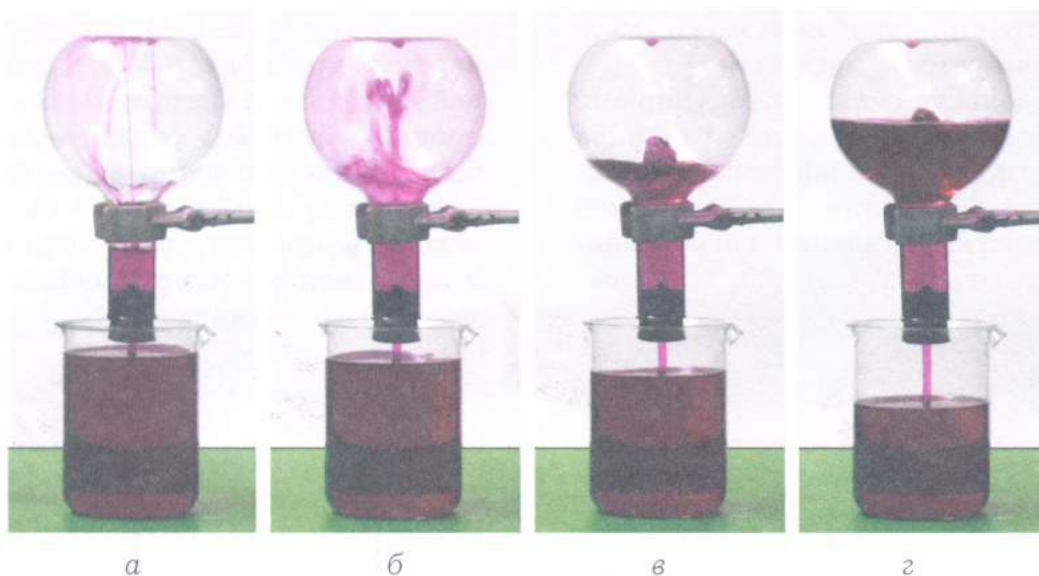


Рис. 5

Результат опыта объясняется, конечно, тем, что теперь в колбе находится не нагретый воздух, а нагретый насыщенный водяной пар. Первые порции холодной воды, вошедшие в колбу, охлаждают этот

пар, он конденсируется в капли воды, давление в колбе резко снижается, и из трубки начинает бить фонтан. Новые порции холодной воды приводят к дальнейшей конденсации насыщенного пара и сниже-

нию давления в колбе. Вода заполняет колбу до тех пор, пока давление в колбе оставшегося воздуха и насыщенного при температуре холодной воды водяного пара не сравняется с наружным атмосферным давлением.

Воздух в колбе остаётся по двум

причинам: во-первых, при кипячении воды никогда не удаётся удалить из сосуда весь воздух, поскольку колба через отверстие в трубке соединяется с атмосферой, и во-вторых, в воде всегда имеется небольшое количество растворённого воздуха.

4. Охлаждение насыщенного пара

По закону Дальтона давление смеси воздуха и пара в замкнутом сосуде равно сумме парциальных давлений воздуха и пара по отдельности. При охлаждении воздуха давление в сосуде уменьшается практически по линейному закону. Это объясняется тем, что кинетическая энергия хаотического движения молекул пропорциональна температуре газа.

Если охлаждать насыщенный пар, то его давление уменьшается гораздо значительно, чем давление газа. Это происходит потому, что кроме уменьшения кинетической энергии молекул уменьшается и их концентрация, так как часть пара конденсируется в жидкость.

Поскольку силы молекулярного взаимодействия зависят от вида жидкости, каждая жидкость характеризуется вполне определённой зависимостью давления насыщенного пара от температуры. Следова-

тельно, при одних и тех же условиях охлаждение пара разных жидкостей приведёт к различным изменениям давления в смеси воздуха и пара.

Чтобы убедиться в справедливости изложенных соображений, поставьте простой опыт.

К стеклянной пробирке подберите резиновую пробку, в которую вставьте отрезок стеклянной трубки внутренним диаметром 3 мм и длиной 50 мм.

На электроплитку с закрытой спиралью поставьте стакан с водой и доведите воду до кипения. В получившуюся водяную баню погрузите пробирку и нагрейте заключённый в ней воздух (рис. 6 а). Быстро переверните пробирку и конец стеклянной трубки опустите в стакан с холодной водой. Вы увидите, что при охлаждении воздуха вода немного входит в пробирку (рис. 6 б). Чтобы ускорить процесс, пробирку можно полить сверху холодной водой.

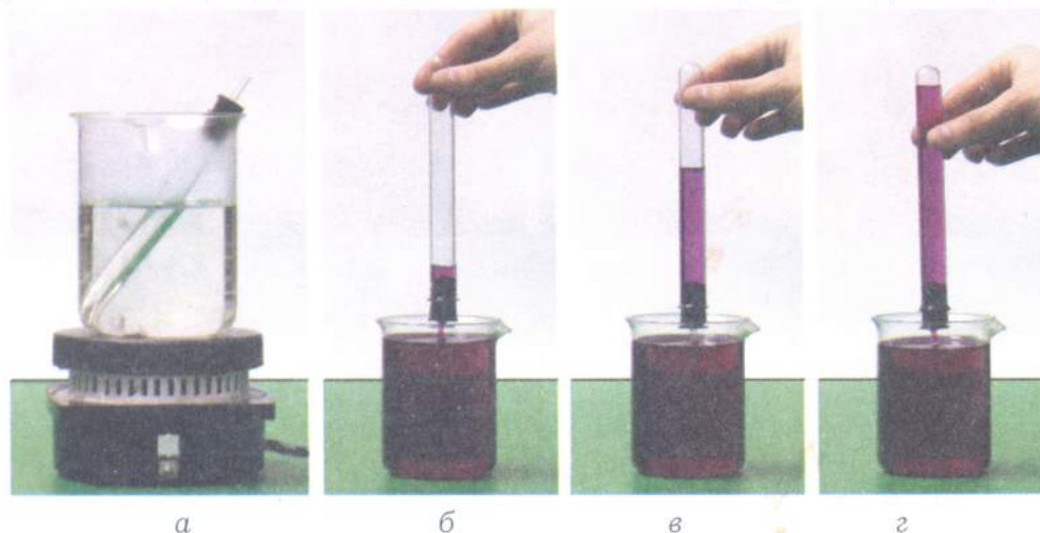


Рис. 6

Теперь в пробирку налейте немного воды и, нагрев воду на водяной бане, полностью повторите опыт. Вы обнаружите, что холодная вода поднимается в пробирке до более высокого уровня (рис. 6 в). До какого именно? До такого, при котором суммарное давление столба воды и воздушно-паровой смеси в пробирке равно атмосферному давлению.

Наконец, налейте в пробирку немного спирта и, нагрев его на во-

дяной бане, переверните пробирку и опустите трубку в холодную воду. Вы увидите бурный фонтан из воды, заходящей в пробирку, и спустя несколько секунд пробирка окажется почти полностью заполненной жидкостью (рис. 6 г)!

Таким образом, проделанная серия опытов подтверждает высказанные в начале исследования предположения.

5. Кавитация при конденсации насыщенного пара

При движениях с большой скоростью в жидкости появляются области сжатия и разрежения. Жидкость слабосжимаема, поэтому в фазе сжатия её физические свойства меняются незначительно. В фазе разрежения при достаточно большом отрицательном давлении жидкость не выдерживает и рвётся. При этом возникают пузырьки, заполненные насыщенным паром, которые получили название *кавитационных*. Эти пузырьки долго не живут и уже в следующей за фазой разрежения фазе сжатия схлопываются.

Скорость схлопывания кавитационного пузырька велика, поэтому при его схлопывании развиваются громадные давления. Кроме того, схлопывание пузырька часто приводит к формированию *кумулятивной струйки*. Ударные волны давления и огромное количество кумулятивных струек приводят к тому, что твёрдые тела в области кавитации интенсивно разрушаются. Однако кавитацией научились управлять и с пользой применяют это явление на практике.

Нетрудно поставить опыт, в котором кавитация моделируется схлопывающимися пузырьками насыщенного пара.

В небольшую колбу налейте немного воды и закройте отверстие колбы резиновой пробкой со стек-

лянным патрубком. На патрубок натяните конец резинового шланга. Во второй конец шланга вставьте стеклянную пипетку с отверстием диаметром около 1 мм. Колбу с водой поставьте на электроплитку и конец пипетки опустите в стакан с водой на глубину 1–2 см (рис. 7). Включите электроплитку и внимательно наблюдайте за происходящими явлениями.

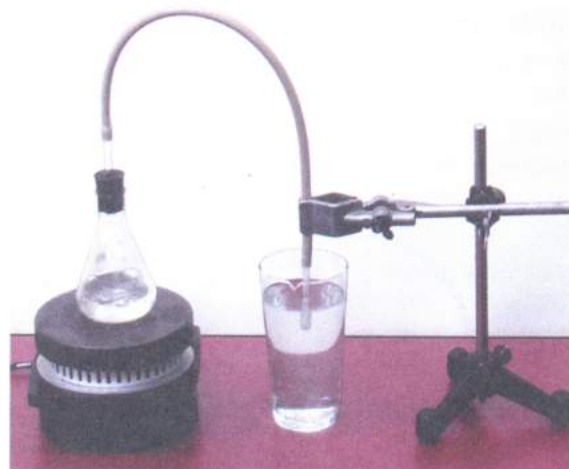


Рис. 7

Вскоре вы обнаружите, что из отверстия пипетки практически бесшумно начинают выходить пузыри, которые, всплывая вверх, уменьшаются и, достигнув поверхности воды в стакане, исчезают. Вода в стакане остаётся примерно такой же холодной, какой была в начале опыта. Так продолжается до тех пор, пока вода в колбе не закипит. Сразу после

этого из стакана с холодной водой начинает исходить довольно громкий резкий звук. Видно, что теперь пузырьки не всплывают в жидкости, а исчезают непосредственно возле отверстия пипетки. Вода в стакане быстро нагревается.

Результат опыта объясняется тем, что в его начальной фазе из сопла в холодную воду выходит нагретый воздух с насыщенным водяным паром. Воздух охлаждается, а пар конденсируется, поэтому пузырьки, поднимаясь вверх, уменьшаются в объеме. В заключительной стадии эксперимента в колбе вообще не остаётся воздуха, и из сопла в холодную воду поступает насыщенный

водяной пар. Пузырьки насыщенного пара схлопываются непосредственно возле сопла, при этом возникают ударные волны, которые и воспринимаются как резкий звук. При конденсации пара выделяется теплота парообразования, поэтому холодная вода в стакане быстро нагревается.

Это типичный кавитационный процесс. Вы без труда можете наблюдать в стакане мельчайшие пузырьки, остающиеся после схлопывания больших кавитационных пузырей. Если вблизи сопла поместить тонкую алюминиевую фольгу, то ударные волны кавитации оставят на ней хорошо заметные вмятины.

6. Теплота конденсации пара

Удельная теплота парообразования воды при температуре кипения для нормального атмосферного давления составляет $r = 2260$ кДж/кг. При конденсации пара выделяется такое же количество теплоты, которое затрачено на его образование. Чтобы убедиться в этом, можно поставить опыт, собрав экспериментальную установку в соответствии с рис. 8.

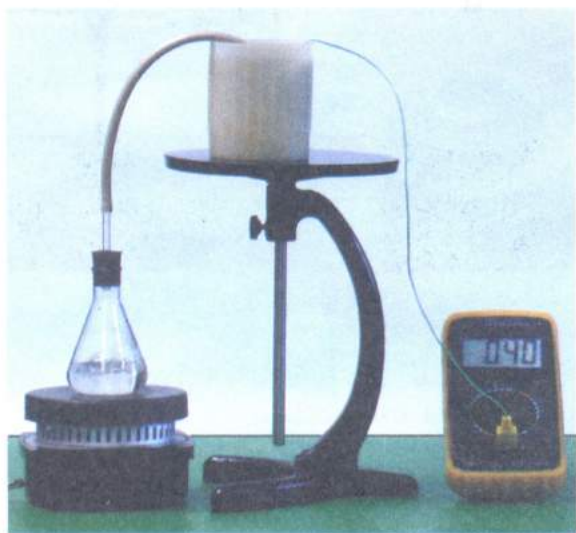


Рис. 8

Отверстие колбы с водой перекройте резиновой пробкой, в кото-

рую вставлен отрезок стеклянной трубки. На трубку наденьте пластиковый шланг и на конце его закрепите стеклянное сопло. Колбу с водой поместите на электроплитку с закрытой спиралью. Сопло опустите в школьный калориметр с водой, в которую погружён спай термодпары, соединённой с мультиметром.

Калориметр поставьте выше колбы. Сделать это нужно для того, чтобы при кипении воды в колбе капли, образующиеся в шланге благодаря конденсации пара, попадали не в калориметр, а обратно в колбу.

Включив электроплитку, вы увидите, что повторяются явления, которые вы наблюдали в предыдущем исследовании. Но теперь вы уже можете количественно оценить происходящий процесс.

В одном из наших опытов получились следующие результаты. Начальная масса и температура воды в калориметре $m_1 = 0,2$ кг, $t_0 = 26$ °С, масса алюминиевого стакана в калориметре $m_2 = 4,35 \cdot 10^{-2}$ кг, масса сконденсировавшегося пара $\Delta m = 5 \cdot 10^{-3}$ кг, конечная температура воды в калори-

метре $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Учитывая, что удельные теплоёмкости воды и алюминия соответственно равны

$$c_1 = 4,2 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К} \text{ и}$$

$$c_2 = 0,9 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К},$$

а температура кипения воды в колбе $t' = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, из уравнения теплового

баланса

$$m_1 c_1 (t - t_0) + m_2 c_2 (t - t_0) = r \Delta m + \Delta m c_1 (t' - t)$$

получаем, что удельная теплота парообразования воды $r = 2,2 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$, что достаточно близко к приведённому выше табличному значению.

7. Для самостоятельного исследования

1. *Пары и их физические свойства.* Если вы заинтересовались рассмотренными в статье явлениями, то имеет смысл найти «Элементарный учебник физики» (В 3 т. / Под ред. Г. С. Ландсберга: Т. 1. Механика. Теплота. Молекулярная физика. – М.: Физматлит, 2004. – 608 с.). Вчитайтесь в главу «Свойства паров» этой замечательной книги (с. 529–563), и вы узнаете много интересного. Физическая сущность закона Дальтона для газов и его экспериментальное обоснование даны на с. 443 рекомендованного учебника.

2. *Зависимость давления насыщенного пара от температуры.* Разработайте экспериментальную установку, позволяющую исследовать зависимость давления насыщенного водяного пара от его температуры. Подскажем, что удобнее сначала получить насыщенный пар при относительно высокой температуре, а затем охлаждать его. Давление в принципе можно измерить горизонтально расположенной манометрической трубкой с каплей воды, один конец которой соединён с сосудом, заполненным насыщенным паром, а второй герметически закрыт пробкой.

3. *Гидродинамический удар.* Подробно элементарная теория и экспериментальное исследование гид-

родинамического удара в стеклянной бутылке с водой представлены в журнале «Квант» (2005. – №6. – С. 27–29).

4. *Моментальная фотография.* Чтобы получить фотографию требуемой стадии быстропротекающего процесса, можно использовать лампу-вспышку и цифровой фотоаппарат, позволяющий открывать затвор на произвольное время (устанавливать выдержку «от руки»). Синхроконттакт лампы-вспышки соединяют с парой нормально разомкнутых контактов, которые устанавливают так, чтобы исследуемый процесс сам замыкал их в нужный момент времени. Внимательно рассмотрите рис. 4, продумайте детали и поставьте эксперимент по фотографированию интересующего вас быстропротекающего процесса.

5. *Ультразвуковая кавитация.* Если вы сделали магнитострикционный излучатель и ультразвуковой генератор (Потенциал – 2006. – №8. – С. 55–60; №9. – С. 75–80), то вам доступны исследования ультразвуковой кавитации. Погрузите конец ферритового вибратора в сосуд с жидкостью и настройте генератор в резонанс с вибратором. Вы услышите резкий шипящий звук – кавитационный шум. Исследуйте разрушающее действие ультразвуковой кавитации на жидкости и твёрдые тела.