

ДЕМОНСТРАЦИЯ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ПРИМЕРАХ ИЗ СТАТИКИ И ДИНАМИКИ ЖИДКОСТИ

Работа посвящена изложению ряда экспериментов по статике и динамике жидкости, которые показывают физические явления в их взаимосвязи. Они могут использоваться как в средней школе, так и в вузе. Они могут использоваться как на лекциях, так и в лаборатории. Особое внимание уделяется анализу взаимосвязи явлений в этих экспериментах.

Ключевые слова: взаимосвязанные явления, статика и динамика жидкости, демонстрационный и лабораторный эксперимент.

1. Введение

При изучении физики в центре внимания всегда должен находиться учебный физический эксперимент. Он является незаменимым как при знакомстве с физическими явлениями в средней школе, так и при углубленном изучении явлений в высшем учебном заведении. В схемах ступенчатого образования и кредитно-модульной подготовки учителя физики, в особенности в связи с постоянно присутствующей тенденцией к уменьшению количества лекционных часов, на первый план выступает создание таких приборов, которые позволили бы использовать их не только на лекциях, но и в домашних условиях.

Развитие физических исследований является неисчерпаемым источником для постановки лекционных и лабораторных экспериментов. Мах [1] справедливо замечает, что «*взгляд Галилея на движение брошенного тела, как на процесс, сложенный из двух различных независимых друг от друга движений, кладет начало целому ряду аналогичных важных процессов познания*». Разложение процессов на независимые друг от друга части Фолькманн [2] называет *изоляцией*, а сложение процесса из таких частей *суперпозицией*. Между тем, «*только в очень редких случаях природа выступает перед нами единой со всем обилием своих явлений, но в большинстве случаев мир явлений, наоборот, носит характер безусловно сложный... Одна из задач нашего познания будет заключаться в том, чтобы понять явления, как они нам даны, сложенными из целого ряда частных явлений и сначала изучить эти последние во всей их чистоте. Только тогда, когда мы знаем, какое участие принимает каждое частное явление в общем явлении, мы можем овладеть всем целым*» [2]. Поэтому обычно в учебных экспериментах выделяют какое-либо одно из изучаемых явлений, стараясь уменьшить роль других факторов. Однако, как справедливо замечает Бугаев [3]: «*Демонстрация — это показ учителем физических явлений и связей между ними*». В реальном эксперименте приходится иметь дело с несколькими взаимосвязанными явлениями, и представляется целесообразным подготовить будущего педагога, ученого или инженера к встрече с такой ситуацией. Для реализации программы демонстрации как изолированных, так и взаимосвязанных явлений, необходимо учебное оборудование. Зворыкин [4] дал классификацию учебного оборудования по физике. В этой классификации для нас представляет особый интерес группа оборудования, которую он назвал «*обособленные приборы*» (в частности, приборы для воспроизведения явлений). К ним автор относит приборы-игрушки (пьющий утенок, воздушный винт, реактивный автомобиль и др.). Мы хотели бы сразу отметить различие в использовании терминологии. Зворыкин говорит в своей классификации о взаимосвязанных *приборах*, мы же будем описывать устройства для демонстрации взаимосвязанных *явлений*. На наш взгляд, именно приборы-игрушки, как правило, являются хорошим примером материальной базы для демонстрации взаимосвязанных явлений. В стремлении содействовать их использованию в учебном процессе на эту тему проводятся международные конференции [5].

Несмотря на то, что мы вполне согласны с термином Фолькманна *изоляция*, мы считаем, что употребление термина *суперпозиция* может подразумевать отсутствие взаимозависимости между отдельными элементарными явлениями, составляющими сложное, что справедливо далеко не всегда. Поэтому в нашем сообщении мы приведем два примера, в отношении первого из которых он может быть употреблен, а в отношении второго его, скорее всего, следует избегать. В течение ряда лет мы используем эти эксперименты на занятиях с будущими учеными и педагогами.

2. Гидростатика тел, погруженных в жидкость

Первый пример относится к экспериментам, посвященным гидростатике тел, погруженных в жидкость. Нас здесь вдохновляло еще и следующее обстоятельство. Сегодня мировая сеть Интернет предоставляет нам огромное количество материала по любому вопросу, давая возможность быстро определить уровень, на котором эта проблема рассматривается. Мы провели широкое исследование материала, доступного в сети в отношении формулировки и применения закона Архимеда, и обнаружили, что этот вопрос заслуживает более детального обсуждения. Так случилось, что одному его аспекту уделяется недостаточное внимание в большинстве известных нам учебников. Давайте рассмотрим этот вопрос путем решения соответствующей задачи и сравнения результата ее решения с наблюдениями, полученными в эксперименте. Это будет полезно еще и потому, что при преподавании общего курса физики в вузе обычно при обсуждении закона Архимеда обходятся без экспериментов, считая, что они уже были показаны в ходе изучения данного вопроса в средней школе.

Задача 1. Речь идет о силах, которые действуют, скажем, на сваю, которая возвышается над дном на высоту h . Свая имеет форму цилиндра, площадь поперечного сечения S и плотность ρ . Она вбита в дно пруда или реки глубины, H , в отсутствие сплошного слоя воды между основанием сваи и грунтом, и, например, полностью погружена в воду (рис. 1). Действует ли на сваю сила Архимеда?

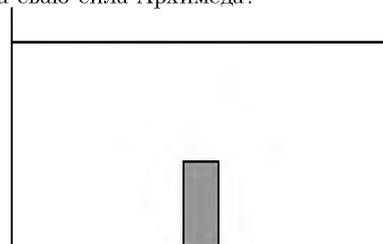


Рис. 1. Свая, полностью покрытая водой

Решение. Для того чтобы ответить на этот вопрос, мы сначала будем действовать, как обычно делает учащийся, и применим закон Архимеда в его стандартной формулировке. Как хорошо известно, она гласит, что «**если тело полностью или частично погружено в жидкость, то на него действует выталкивающая сила, равная весу жидкости, вытесненной погруженной частью тела**». В соответствии с толковым

словарем слово «погруженный» означает «помещенный под поверхность воды». Представляется, что это убедит учащегося применить закон Архимеда в его вышеприведенной формулировке. Интересно отметить, что одна из формулировок, принадлежащих самому Архимеду, гласит [6]: «Тела более легкие, чем жидкость, опущенные в эту жидкость, будут выталкиваться вверх с силой, равной тому весу, на который жидкость, имеющая равный объем с телом, будет тяжелее этого тела». В результате вычисления учащийся получит **выталкивающую (вверх) силу** величиной

$$F_A = \rho_0 g S h.$$

где ρ_0 – плотность воды, а g – ускорение свободного падения.

Но этот результат вычисления находится в полном противоречии с наблюдениями, которые легко выполнить в аудитории или дома. На рис. 2 изображен наш демонстрационный прибор [7, 8].

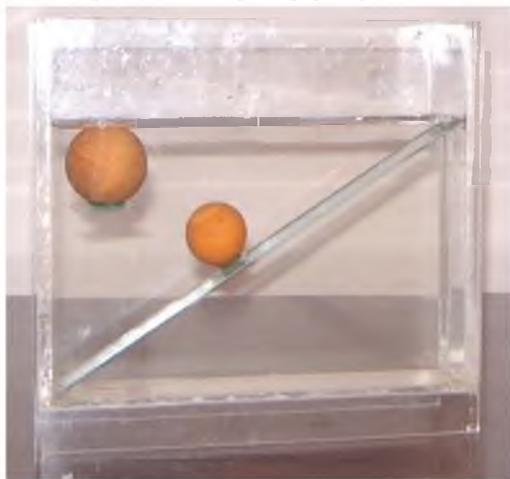


Рис. 2. Прибор для демонстрации явлений, связанных с погружением тел в жидкость

Это обычная коробка из оргстекла, частично наполненная водой, в которой находятся два поплавка. Каждый из поплавков сделан из деревянного шара, к которому прикреплена стеклянная пластинка (например, предметное стекло для микроскопа). (Вы можете использовать в качестве поплавков шарики для настольного тенниса, парафин или любые другие материалы со средней плотностью меньше плотности воды. Разница в диаметрах шаров здесь не имеет значения). Мы также поместили внутрь воды под некоторым углом ко дну пластинку зеркального стекла. Поверхности стеклянных пластинок, которые контактируют между собой, следует потереть пальцами со следами пластилина на них, чтобы вода не смачивала эти поверхности. Большой шар плавает, а меньший стоит на зеркальной пластинке. Почему меньший шар стоит? Если меньший шар просто опустить в воду, он будет плавать, как и большой. Но если его с силой ввести в воду до соприкосновения прикрепленной к нему стеклянной пластинки с зеркальным стеклом и поставить на стекло, то он сначала будет двигаться вдоль стекла, как бы «въезжая» на наклонную плоскость, а потом «застрянет» на нем и останется в покое. Почему, будучи поставлен силой на зеркальное стекло, поплавок сначала движется, а потом останавливается?

Мы можем получить ответы на эти вопросы, внимательно изучив вывод закона Архимеда, поскольку привычная формулировка **не дает указания на происхождение выталкивающей силы**. Давление в жидкости растет с глубиной и вследствие закона Паскаля действует во все стороны одинаково. Конечно, происхождение выталкивающей силы связано с **разницей давлений**, которые действуют на верхнюю и нижнюю поверхности поплавков, в то время как давления с боков взаимно уравновешиваются.

В нашем эксперименте (рис. 2) плавающий поплавок окружен водой со всех сторон, в то время как поплавок, стоящий на зеркальном стекле, не имеет сплошного слоя воды между нижней стороной пластинки, прикрепленной к нему, и верхней поверхностью зеркального стекла, так как эти поверхности не смачиваются водой. Таким образом, вода давит на верхнюю часть прикрепленной пластинки и не оказывает давления на ее нижнюю часть, тем самым прижимая пластинку к стеклу. Разумеется, вода давит на обе поверхности зеркального стекла и на шары обоих поплавков, поскольку они почти полностью окружены водой, так что сила Архимеда на них действует. Для большей убедительности рассмотрим еще одну задачу.

Задача 2. Рассмотрим более реалистичскую модель мостовой опоры, погруженной в воду глубиной H , без сплошного слоя воды под ее основанием. Опора состоит из вертикальной сваи высотой h_1 и поперечным сечением S_1 , к которой симметрично прикреплена дополнительная подушка высотой h_2 и поперечным сечением S_2 (рис. 3). Обозначения плотностей совпадают с данными к задаче 1. Действует ли на эту опору выталкивающая сила?

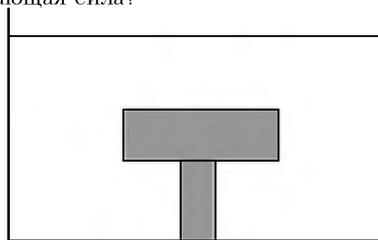


Рис. 3. Мостовая опора, покрытая водой.

Решение.

а) На верхнюю поверхность подушки действует со стороны воды вниз сила величиной

$$F_{\downarrow} = \rho_0 g (H - h_1 - h_2) S_2.$$

б) На нижнюю поверхность подушки действует вверх сила величиной $F_{\uparrow} = \rho_0 g (H - h_1) (S_2 - S_1)$.

в) Таким образом, разница сил оказывается равной

$$\Delta F = F_{\uparrow} - F_{\downarrow} = \rho_0 g (H - h_1) (S_2 - S_1) -$$

$$- \rho_0 g (H - h_1 - h_2) S_2 = \rho_0 g (h_1 S_1 + h_2 S_2 - H S_1).$$

То есть, **найденная сила равна силе Архимеда за вычетом слагаемого, которое зависит от глубины воды**. Дополнительное отрицательное слагаемое как раз равно по модулю силе, которая действовала бы на основание сваи, если бы под ним был как угодно тонкий, но сплошной слой воды. Наличие этого отрицательного слагаемого и его зависимость от глубины воды приводит нас к заключению, что при достаточно большой глубине эта разница сил может сменить знак и уже не будет выталкивать тело, погруженное в воду! Отметим здесь, что для упражнений в рассматриваемом вопросе может быть полезен задачник [9], содержащий несколько задач данного типа.

Объясним теперь поведение поплавка, силой поставленного на зеркальное стекло. Здесь возможны два типа поведения в зависимости от явлений, происходящих между нижней поверхностью стеклянной пластинки поплавка и верхней поверхностью зеркального стекла. Свободное движение поплавка вдоль наклонного зеркального стекла возможно, если между стеклянными поверхностями есть отдельные капли воды. Тогда поплавок может свободно «ехать» на этих каплях вдоль стекла, независимо от того, как расположено стекло, горизонтально или наклонно. Поскольку в нашем эксперименте оно расположено наклонно, давление жидкости сверху на пластинку удерживает ее на зеркальном стекле, а сила Архимеда, действующая на деревянный шар, заставляет поплавок «ехать» вверх вдоль зеркального стекла. В процессе этого движения имеются две возможности. Если капли воды будут вытеснены

из-под пластинки, поплавок «застрянет». В этом случае обычно говорят о «присасывании». Конечно, здесь вступают в игру силы молекулярного сцепления между стеклянными поверхностями, находящимися в плотном контакте. Если, наоборот, капли сольются вследствие проникновения воды извне и под пластинкой появится сплошной слой воды, то прижимающее усилие резко уменьшится вследствие возобновления действия закона Паскаля и поплавок всплывет.

Приведенные выше рассуждения показывают, что решающим фактором в поведении тел, погруженных в воду, но не окруженных водой со всех сторон, является состояние жидкости между поверхностью тела и дном водоема, если она там есть вообще, или ее отсутствие. Важный случай представляет наличие грязи между поверхностью тела и дном водоема. Поскольку грязь представляет собой смесь воды, твердых частиц и воздуха, то при определенной концентрации ее составляющих можно ожидать невыполнения закона Паскаля и, как следствие, закона Архимеда, и тогда вновь мы возвращаемся к ситуации, отраженной на рис. 3 и в задаче 2. Описанное явление наблюдалось, в частности, в виде «присасывания» подводных лодок ко дну водоемов, покрытых грязью, когда для обеспечения всплытия оказывалось необходимым промыть пространство под лодкой.

3. О реакции вытекающей и втекающей жидкости

Рассмотрим теперь второй пример, который относится к вопросу о реакции жидкости, вытекающей в сосуд или вытекающей из него. В отношении экспериментов здесь мы снова можем обратиться к книге Маха [1], где на с.267 приводится демонстрационный эксперимент с реакционным колесом.



Рис. 4.

«Когда через трубки (рис. 4) истекает воздух или светильный газ в направлении короткой стрелки, все колесо начинает вращаться в направлении большой стрелки... Легко можно было бы подумать, что при всасывании должно наступить обратное движение реакционных колес, чем при вдувании воздуха. В действительности, этого, однако, обыкновенно не бывает... Если поэтому упругий шар соединить с единственной трубкой, соединенной с колесом, и периодически надавливать шар так, чтобы попеременно вдувалось и всасывалось одно и то же количество воздуха, то колесо вращается в том же направлении, как и при вдувании воздуха».

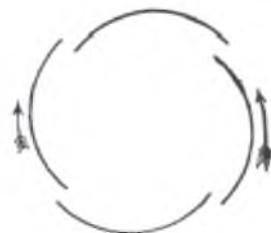


Рис. 5.

На с.268 этой же книги Мах приводит разрез прибора, демонстрирующий иное поведение при вдувании или всасывании воздуха (рис. 5) со следующим описанием: «Если пробуровать нижнее основание полого цилиндра, закрытой бумажной коробки, например, и поместить цилиндр на острие трубки, вырезав и отогнув верхний слой так, как это указано на рисунке, то этот цилиндр при вдувании воздуха вра-

щается в направлении большой стрелки, а при высасывании его — в направлении меньшей стрелки. Вступая в цилиндр, воздух может здесь свободно продолжать вращение, вследствие чего это последнее и компенсируется обратным вращением». Мах ограничился качественным обсуждением этих экспериментов. Благодаря интересной статье [10] мы узнали, что этому важному вопросу посвятил две работы Н.Е.Жуковский [11,12]. В первой из них он дает с единых позиций приближенное аналитическое рассмотрение реакций вытекающей и втекающей струй, показывает, что реакция втекающей струи, по крайней мере, намного меньше реакции вытекающей струи, а также приводит ряд демонстрационных экспериментов и их обсуждение. Во второй статье он обращает внимание читателя на статью Т.Шенеманна [13], «из весьма тщательных экспериментов которого следует прийти к заключению, что реакция втекающей жидкости близка к нулю при всевозможных способах ее вхождения в сосуд». Кроме того, в ней Жуковский дает строгое аналитическое рассмотрение на основе уравнений гидродинамики, из которого следует, что «в беспредельной жидкости, при отсутствии сил трения и разрывов, обе реакции должны были бы быть равны нулю. Таким образом, оказывается, что результат, найденный Шенеманном, вполне согласуется с теорией, а требует особого объяснения конечная величина прямой реакции. Это объяснение заключается в том, что при втекании жидкости скорости внешней жидкой массы до самого отверстия сосуда изменяются непрерывно, скорости же вытекающей жидкости прерывны и образуют луч жидкости». Дальнейшие детальные пояснения по поводу вытекающей струи мы приведем, следуя книге [14]. «Струя, вытекающая через отверстие из пространства с давлением p_1 в пространство с давлением p_2 , несет с собой в секунду импульс $\frac{dP}{dt} = \rho S v^2$, где ρ — плотность жидкости, S — площадь поперечного сечения струи. Если принять, что в пространстве 1 скорость струи жидкости пренебрежимо мала, то из уравнения Бернулли $\frac{p_2}{\rho} + \frac{v^2}{2} = \frac{p_1}{\rho}$ мы получим, что

$$v = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

Тогда для импульса, который в секунду переносит струя, будем иметь выражение

$$\frac{dP}{dt} = 2S(p_1 - p_2),$$

то есть он равен удвоенной силе, с которой разница давлений действовала бы на поршень с площадью, равной площади сечения струи. Так как этот импульс должен иметь известный эквивалент в распределении давления, то отсюда следует, что благодаря: 1) исчезновению вблизи отверстия избыточного статического давления; и, кроме того, 2) уменьшению давления вследствие притока жидкости к отверстию, поскольку на стенку сосуда, где имеется отверстие, давление действует меньше, чем на стенку без отверстия. Именно, исчезает давление, соответствующее удвоенной площади сечения струи. Это уменьшение давления и обнаруживается в виде давления, направленного назад, или «реакции вытекающей струи».

В последние двадцать лет большое внимание к вопросу о реакции втекающей и вытекающей струй было привлечено благодаря публикации бестселлера [15], в котором в живой форме было рассказано об экспериментах, которые проводил над так называемым «обращенным спринклером» известный ученый и педагог Р.Фейнман в Принстоне, когда он учился в аспирантуре у проф. Дж.Уилера. Вопрос в книге был сформулирован так. Многие знают, что головка устроения для полива газона вращается, когда из нее

вытекает вода. (Также ведет себя головка системы пожаротушения, называемой спринклерной.) Будет ли эта головка вращаться, если в нее загонять воду под давлением в обратном направлении? Эта публикация породила такой большой поток статей в Американский физический журнал с пояснениями, которые часто противоречили друг другу, что журнал в 1990 году объявил мораторий на публикации о спринклере. Мы тоже заинтересовались данной задачей, и поставили вопрос о создании демонстрационного прибора, который показал бы наглядно реакции вытекающей и втекающей струй. На рис. 6 изображен наш демонстрационный прибор [16].



Рис. 6. Прибор для демонстрации реакций вытекающей и втекающей струй

Прибор представляет собой вариант картезианского ныряльщика. В сосуд, наполненный водой и закрытый сверху с помощью резиновой мембраны, помещена стеклянная пробирка, заткнутая пробкой. Внутри пробки вставлена стеклянная трубка с S-образным разветвителем и двумя соплами. Масса поплавка с водой подобрана так, чтобы при несильном нажатии пальцем на мембрану поплавок тонул. Он тонет вследствие дополнительного поступления воды внутрь поплавка из-за увеличения давления в сосуде. **Несмотря на приток воды внутрь S-образной трубки поплавок, тонущий поплавок не вращается.** Однако при снятии давления с мембраны он всплывает, **вращаясь вокруг продольной оси**, так как воздух, сжатый внутри поплавка при его погружении, выталкивает из него воду, опустошая поплавок. Поплавок вращается при всплывании, так как вода покидает поплавок в виде двух струй, реакция которых создает вращающий момент, направленный в сторону, противоположную вытеканию воды, и закручивающий поплавок вокруг вертикальной оси. Для лучшего наблюдения струй можно подкрасить воду внутри поплавка, например, флуоресцентом. Хорошо видны «лучи жидкости» Жуковского, которые представляют собой затопленные струи, отделенные от остальной жидкости слоем вихрей, их окружающих. Вихри образуются в результате неустойчивости границы раздела струя – остальная жидкость. Механизм неустойчивости подобен механизму, вызывающему полоскание флага на ветру или движение волн на поверхности воды под действием ветра. Эти вихри можно продемонстрировать в воздухе по отдельности с помощью цилиндрической коробки, наполненной дымом. Один из торцов коробки имеет круглое отверстие, а второй затянут кожей наподобие барабана. Удар по коже сопровождается вылетом устойчивого вихря, помеченного дымом. Вихри в воде можно получить с помощью пипетки и чернил [17]. В обоих случаях играют роль силы вязкого трения. Опыты показывают, что полная аналогия имеет место лишь в первый момент после образования вихрей. В дальнейшем поведение вихрей в воде и воздухе отличается различным.

3. Заключение

В настоящей работе мы привели два оригинальных прибора (рис. 2 и рис. 6), которые, наряду с хорошо известными экспериментами по плаванию тел, позволяют наблюдать поведение тел, погруженных в жидкость, но не имеющих сплошного слоя жидкости под ними, а также реакцию вытекающей и втекающей струй. Они сделаны из доступных материалов и могут использоваться как на лекциях, так и в лаборатории. Они предоставляют учащемуся большие возможности варьирования условий экспериментов, а также проведения соответствующих расчетов.

Список использованных источников:

1. Мах Э. Механика. – Санкт-Петербург: Типография т-ва «Общественная польза», 1909. – С.126.
2. Volkman. Erkenntnistheoretische Grundzuege der Naturwissenschaft, 1896. – S.70 (цитируется по книге [1] – С.127).
3. Бугаев А.И. Методика преподавания физики в средней школе. – М. Просвещение, 1981. – С.157.
4. Зворыкин Б.С. Система учебного эксперимента по физике и учебное оборудование // Физика в школе. – №3. – 1969. – С.3-14.
5. ICPE-GIREP International Conference ‘Hands-on Experiments in Physics Education’, Duisburg-Germany, August 23-28. – 1998.
6. Голин Г.М., Филонович С.Р. Классики физической науки. – М.: Высшая школа, 1989. – С.28.
7. Валиев Б.М., Егоренков В.Д. Закон Архимеда и поплавок // Проблемы учебного физического эксперимента: Сб. научн. трудов. – №9. – СПб, 1999. – С.45-48.
8. Valiyov B.M. and Yegorenkov V.D. Do fluids always push up objects immersed in them? // Physics Education. – V. 35. – №4, July. – 2000. – P.284-286.
9. Кашина С.И., Сезонов Ю.И. Сборник задач по физике. – М., Высшая школа, 1983.
10. Майер В. Реакция вытекающей и втекающей струи // Квант. – №9. – 1978. – С.20-21.
11. Жуковский Н.Е. О реакции вытекающей и втекающей жидкости. (Статья первая) // Собрание сочинений. – Т.3. – М.-Л., 1949. – С.255.
12. Жуковский Н.Е. О реакции вытекающей и втекающей жидкости. (Статья вторая) // Собрание сочинений. – Т.3. – М.-Л., 1949. – С.260.
13. Schoenemann Th. Monatsberichte der Koeniglichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. 15.IV. – 1858.
14. Пеишь Т., Эвальд П., Прандтль Л. Физика упругих и жидких тел / Перевод с нем. проф. К.А.Леонтьева ГТТИ. – М.-Л., 1933. – С.227.
15. Feynman R.P. Surely you're Joking, Mr. Feynman, Norton. – 1985.
16. Valiyov B.M. and Yegorenkov V.D. Cartesian diver solves the inverse sprinkler problem // Physics Education. – V.33. – №5, September. – 1998. – P.280 (L).
17. Опыты в домашней лаборатории // Библиотечка «Квант». – Вып. 4. – 1980. – С.18.

The paper is devoted to describing a number of experiments on statics and dynamics of liquids showing the physical phenomena in their mutual relation. They may be used in secondary schools as well as universities. They may be used as lecture demonstrations or in the laboratory. Special attention is devoted to the analysis of the inter-relation between the phenomena in these experiments.

Key words: inter-related phenomena, statics and dynamics of liquids, demonstration and laboratory experiment.

Отримано: 13.05.2005.