

МЕХАНИЧЕСКИЕ АНАЛОГИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

Б.П. БЕЗРУЧКО, доктор физико-математических наук,
профессор Саратовского государственного университета

Д.А. СМИРНОВ,

аспирант Саратовского государственного университета

Н.Н. СУХАЧЕВА, учитель физики школы № 36 г. Саратова

1. ВВЕДЕНИЕ

Еще в XVII веке Я.А. Коменским было сформулировано «золотое правило дидактики», требующее привлекать к обучению все органы чувств. «Понятное» как «привычное и чувственно осязаемое» определял и академик Л.И. Мандельштам, воспитавший плеяду выдающихся физиков. Чем более разнообразно чувственное восприятие материала, тем прочнее он усваивается, — ныне эта закономерность выражается в дидактическом принципе наглядности [1].

Руководствуясь сказанным, далее мы рассматриваем простые и наглядные механические аналоги (гидродинамические модели) некоторых базовых величин и процессов электродинамики, бытовой опыт общения с которыми у школьника отсутствует. Мы сопоставляем заряженные тела и проводники, по которым течет ток, с привычными и осязаемыми цилиндрическими сосудами и трубами с жидкостью (обращение к ним естественно и традиционно), выделяем механические аналоги емкости и индуктивности (п. 2, 3), а затем иллюстрируем полезность введенных моделей и возможности их дальнейшего развития при изучении колебаний и нелинейных явлений (п. 4). Основным принципом, которым мы руководствуемся при выборе аналогов, является требование идентичности выражений для энергии соответствующих электрических и механических систем.

2. ЗАРЯЖЕННОЕ ТЕЛО, КОНДЕНСАТОР, ЕМКОСТЬ, ЭЛЕКТРОПРОЧНОСТЬ

Одноименные заряды отталкиваются, поэтому ансамбли (совокупности, системы) одноименных зарядов в свобод-

ном пространстве неустойчивы и стремятся рассыпаться. В энергетических терминах это означает, что ансамбль близко расположенных элементарных зарядов обладает большей потенциальной энергией по сравнению с их исходным далеким расположением. Эти же заряды, помещенные на твердое тело, остаются на нем и накапливаются до определенного предела, несмотря на взаимное отталкивание. Данный предел определяется формой и материалом тела, а также свойствами окружающей среды. При его превышении происходит «электрический пробой» и лишние заряды покидают ансамбль — «растекаются». Квантово-механическая природа удержания зарядов на твердом теле не рассматривается в школьном курсе физики. Что касается вопроса о причинах устойчивости совокупности одноименных зарядов на теле, то он у школьника и не возникает, если описание подобных явлений начинать с заряда конденсатора — системы двух близко расположенных проводников (обкладок). Тогда «очевидно», что одноименные заряды удерживаются силами притяжения зарядов с противоположной обкладки, а предельные возможности накапливать заряд определяются «электропрочностью» диэлектрического заполнения — величиной напряженности электрического поля, при которой среда между обкладками становится проводящей. Емкость (для отдельного тела $C = q/\varphi$, где q — заряд проводника, а φ — его потенциал; для конденсатора $C = q/U$, где q — заряд, перемещенный с одной обкладки на другую, U — напряжение между обкладками) характеризует способность тела накапливать заряд в том смысле, что у проводника с мень-

шей емкостью предел электропрочности достигается при меньшем заряде.

Педагогический опыт показывает, что, несмотря на очень четкое и логичное изложение материала по электроемкости в базовом учебнике физики [1], над школьником довлеют опыт общения с чайной чашкой и вытекающее из него неправильное представление об электроемкости как о «размере вместилща зарядов», объеме. По всей видимости, этому можно противопоставить лишь другой ракурс — рассмотрение привычного объекта — сосуда с жидкостью (при всей ограниченности и условности такой аналогии). Сопоставим проводящее тело и цилиндрический сосуд, электрические заряды и жидкость (рис. 1). Аналог элементарного заряда — масса элемента жидкости. В свободном пространстве предоставленные самим себе заряды разлетаются, а жидкость вне сосуда под действием силы тяжести растекается по столу. Помещенный на проводник заряд q остается на нем и увеличивает потенциал на величину φ ; доливание массы m жидкости повышает ее уровень в сосуде на h . Руководствуясь желанием иметь идентичные формулы для энергии электростатического поля заряженного тела и потенциальной энергии жидкости в поле силы тяжести, в качестве аналога потенциала используем величину (gh) , где g — ускорение свободного падения. В этом случае аналогом электроемкости становится величина $C_m = m/(gh)$. Отметим, что эта «гидромеханическая емкость» связана не с объемом (вместимостью) сосуда, а с его площадью S . Если сосуд цилиндрический, то $C_m = S(\rho/g)$ не зависит от h и численно равна массе жидкости, которую нужно залить, чтобы уровень поднялся на $1/g$. Так, из двух сосудов одинакового объема «гидромеханическая емкость» больше у более широкого. Максимальное количество накопленной жидкости определяется вы-

сотой стенок или их прочностью, которые играют роль электропрочности в

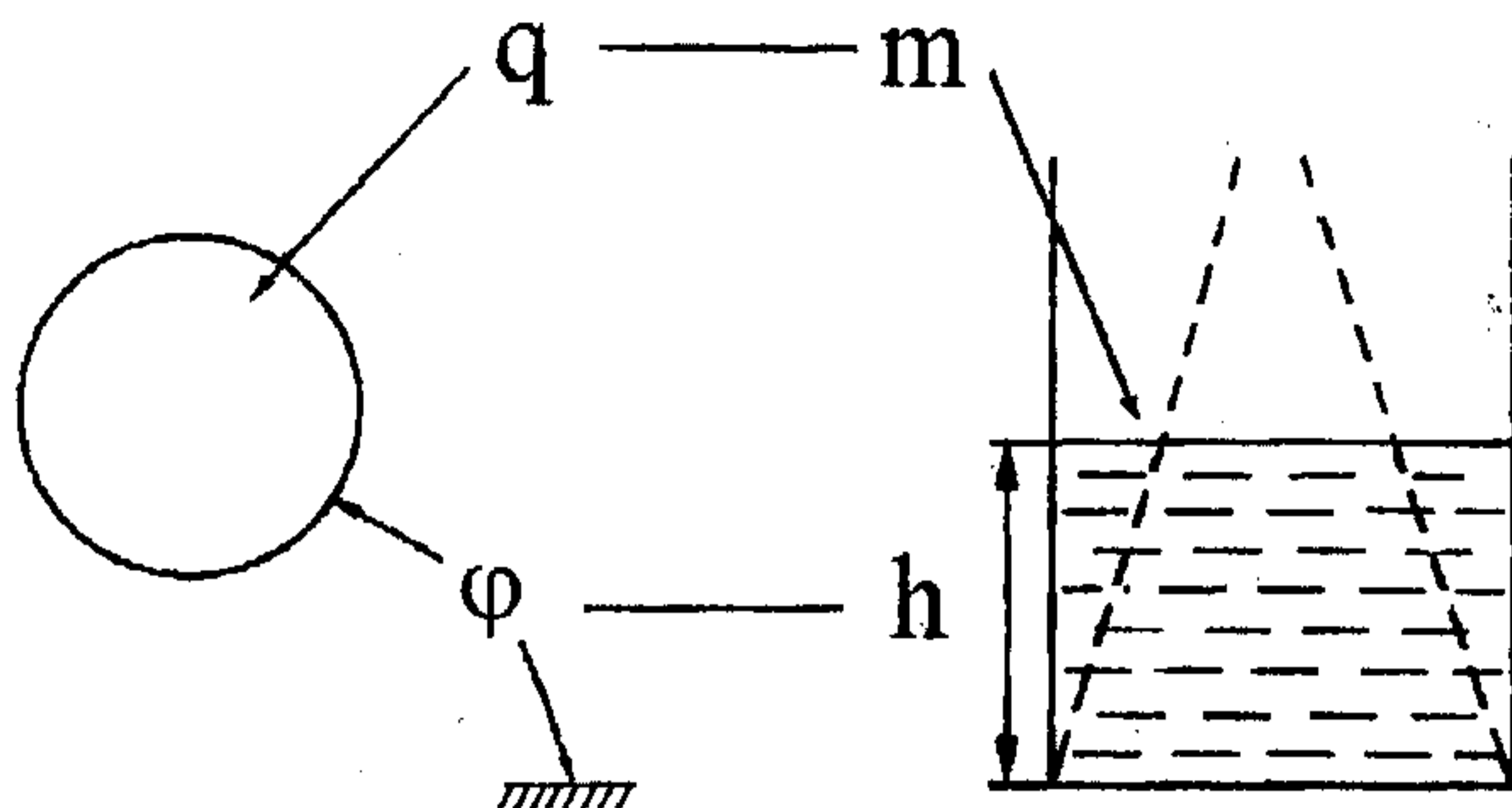


Рис. 1. Гидромеханический аналог заряженного тела — сосуд с жидкостью. Если его стенки параллельны, то «гидромеханическая емкость» не зависит от уровня жидкости, при нарушении цилиндричности (штриховые линии) такая зависимость появляется.

электрической системе (если уровень превышает порог, то жидкость выливается или разрушается сосуд).

Конденсатор состоит из двух проводников, имеющих равный по модулю, но противоположный по знаку электрический заряд. Значит, моделью конденсатора будет система из двух сосудов с жидкостью. В «незаряженном» состоянии уровни жидкости в сосудах совпадают, этот уровень мы примем за нулевой. Заряжать «гидромеханический конденсатор» можно переливая жидкость из одного сосуда в другой, аналогично перемещению электрического за-

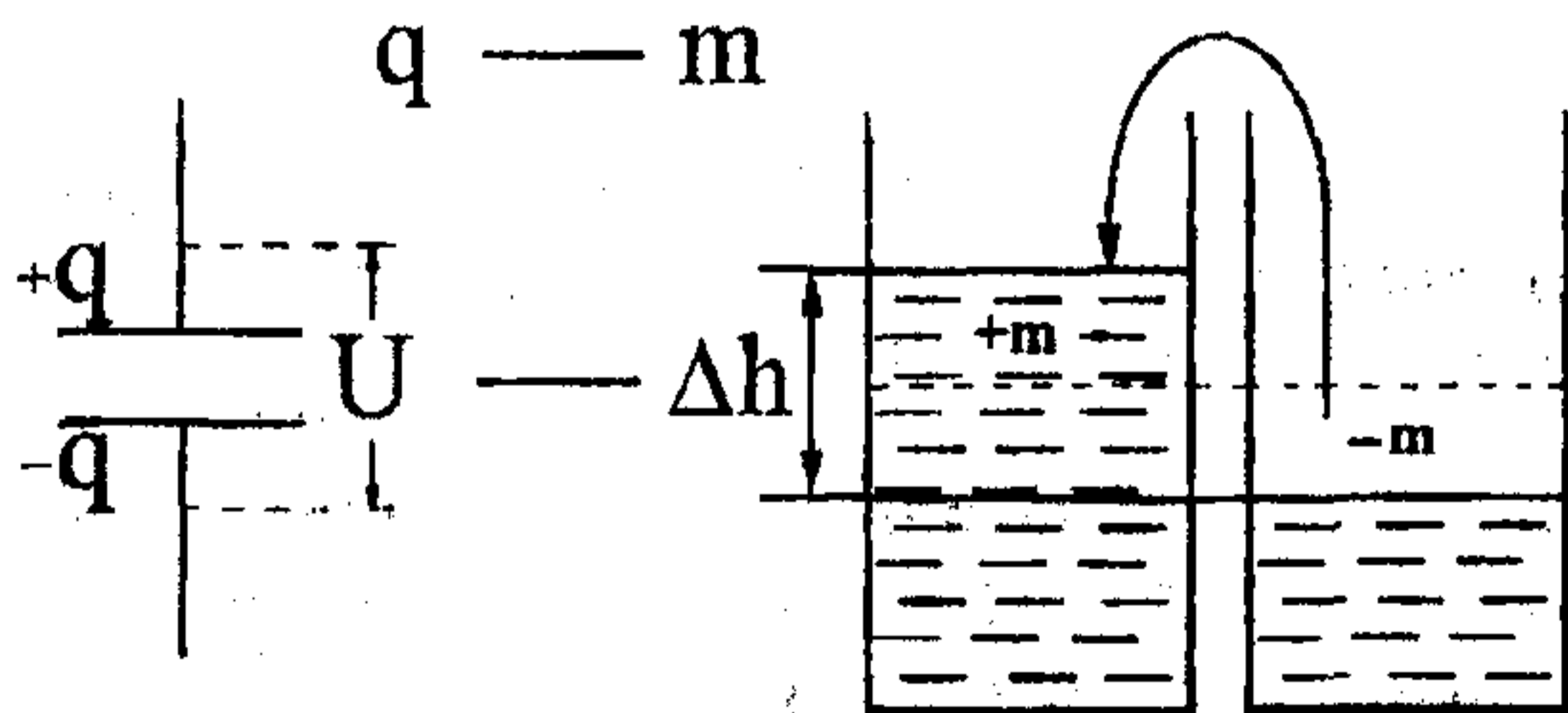


Рис. 2. Гидромеханический аналог конденсатора — два сосуда с жидкостью.

ряда с одной обкладки электрического конденсатора на другую. «Гидромеханическая» емкость системы из двух сосудов, следуя избранному пути рассуждений, определяется как величина, пропорциональная отношению массы жидкости m , перелитой из одного сосуда в другой, к создавшейся при этом разно-

сти уровней Δh (рис. 2): $C_m = m/(g\Delta h)$. Величина $g\Delta h$ здесь является аналогом напряжения между обкладками U , а формулы для потенциальной энергии $W_n = (1/2)C_m(g\Delta h)^2$ и энергии конденсатора $W_э = (1/2)C_m U^2$ идентичны.

Если на обкладки конденсатора поместить заряд, больший, чем позволяет «электропрочность» диэлектрика, наступает *пробой конденсатора*, аналогично, если из одного сосуда в другой перелить слишком много жидкости, она начнет выливаться из сосуда. Таким образом, «емкость» характеризует *скорость заполнения сосуда* и определяется его площадью, высота сосуда или его прочность ставит предел накоплению жидкости. Чем выше сосуд и прочнее материал, из которого он сделан, тем больше жидкости в нем можно накопить. Чем выше электропрочность диэлектрика между обкладками, тем больше предельная величина заряда.

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК, СИЛА ТОКА И КОЭФФИЦИЕНТ САМОИНДУКЦИИ

В качестве аналога проводника с током, руководствуясь соображениями наглядности и привычности, можно использовать цилиндрическую трубку с текущей по ней жидкостью. Сила тока в проводнике определяется величиной заряда, прошедшего через его поперечное сечение за единицу времени: $I = dq/dt$. Поскольку аналогом электрического заряда выступает масса жидкости, «гидродинамическую силу тока» следует определить как массу жидкости, протекшей через поперечное сечение трубки за единицу времени: $I_m = dm/dt$. В отсутствие вязкости и взаимодействия со стенками частицы жидкости движутся с одинаковой продольной средней скоростью тогда гидродинамическую силу тока можно выразить через скорость течения, плотность жидкости и площадь поперечного сечения трубки $I_m = rvS$. Далее из условия идентичности формул, выражающих энергию магнитного поля проводника с током [$W_m = LI^2/2$] и кинетическую энергию движения жидкости

[$W_k = rI^2Sv^2/2 = (l/rS)I_m^2/2$] можно получить механический аналог коэффициента самоиндукции: $L_m = l/rS$. Как видно, эта величина не зависит от интенсивности потока жидкости и определяется только конструктивными особенностями. Чем больше коэффициент самоиндукции проводника, тем больше энергия магнитного поля при фиксированной силе тока. В механической модели при фиксированной гидродинамической силе тока кинетическая энергия тем больше, чем длиннее труба; увеличение площади поперечного сечения требует пропорционально уменьшить и скорость течения, при этом кинетическая энергия уменьшится.

4. ВОЗМОЖНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Введенные механические аналоги позволяют строить модели более сложных электрических систем. Например, электрический колебательный контур, изучаемый на уроках физики, состоит из конденсатора, обкладки которого соединены через катушку индуктивности (сопротивлением проводника пренебрежем). Его модель реализуется с помощью U-образной трубки с жидкостью. Такая система и ее возможное колебательное поведение рассматриваются на факультативных занятиях по физике [2] и в спецкурсах [3]. Вертикальные колена трубки моделируют конденсатор, а вся трубка — проводник с током.

В электрической системе, выведенной из равновесия и предоставленной самой себе, происходят гармонические колебания с периодом $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$. В модельной трубке тоже можно возбудить колебания, если в начальный момент времени создать некоторую разность уровней в коленах. Причем период колебаний в отсутствие трения выражается идентичным T_0 соотношением $T_m = 2\pi\sqrt{L_m C_m}$, где L_m и C_m определяются полученными в п. 2, 3 формулами для гидромеханических аналогов. Перекатке энергии из электрического поля конденсатора в магнитное поле катушки индуктивности соответствует переход

потенциальной энергии жидкости в поле силы тяжести в кинетическую энергию движущегося потока в механической модели.

Используемые аналогии весьма удобны для введения базовых понятий нелинейной физики. Введенная ранее модель заряженного тела (сосуд с вертикальными стенками) — это модель тела с постоянной емкостью, т.е. не зависящей от величин заряда и потенциала. Однако в природе весьма типичны случаи, когда такая зависимость имеется (например, когда проницаемость диэлектрика зависит от напряженности электрического поля). Процессы в системах с постоянной емкостью описываются линейными дифференциальными уравнениями, а с зависящей от заряда — нелинейными, поэтому в последнем случае говорят о нелинейной емкости. В качестве модели тела с нелинейной емкостью можно предложить сосуд, стенки которого не вертикальны, т.е. площадь поперечного сечения меняется с высотой (например, на рис. 1). Конденсатор с нелинейной емкостью моделируется системой из двух сосудов, характер деформации которых определяет вид нелинейности. Причем система из одинаковых сосудов является аналогом конденсатора с симметричной зависимостью емкости от напряжения (вольт-фарадной характеристикой), отличающиеся друг от друга сосуды, соответствуют случаю несимметричной характеристики. Например, нелинейность полупроводникового конденсатора (варакторного диода) соответствует случаю, когда один сосуд по направлению вверх сужается, а другой расширяется. Аналогом дифференциальной

емкости здесь является величина $C_{diff} = dm/d(gh)$.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные механические аналогии электрических величин просты и наглядны. Естественно, что они не могут претендовать на точную копию моделируемых явлений. Например, взаимодействие зарядов между собой в механической модели емкости подменяется взаимодействием элементов жидкости с Землей. В то же время эти модели помогают школьнику сформировать правильные, осязаемые образы электродинамических величин, пригодные для анализа процессов во многих современных устройствах и приспособленные для дальнейшего уточнения при более глубоком изучении физики. Например, изогнутую трубку с монотонно расширяющимся поперечным сечением можно использовать в качестве гидромеханического аналога колебательного контура с нелинейной полупроводниковой емкостью, который имеется в каждом современном радиоприемнике и телевизоре. Эта система вызывает значительный интерес у исследователей нелинейных явлений, поскольку при внешнем периодическом воздействии может демонстрировать очень сложное поведение и динамический хаос. Таким образом, на простых и наглядных объектах можно уже на ранних стадиях обучения заложить основу для восприятия сложных явлений нелинейного мира. Предложенные модели успешно применялись авторами на уроках физики в общеобразовательных школах и лицеях, а также в специальных курсах по нелинейным явлениям и синергетике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Педагогика / Под ред. Ю.К. Бабанского. — М.: Просвещение, 1988.
2. Мякишев Г.Я., Буховцев Б.Б. Физика (учебник для 10 класса общеобразовательных учреждений). — М.: Просвещение, 1998.
3. Кабардин С.Ф., Орлов В.А., Шефер Н.И. Факультативный курс физики: 10-й класс — М.: Просвещение, 1989.
4. Трубецков Д.И. Колсбания, волны, электроны. — Саратов: Колледж, 1994.