

Герман Хэртел

ТАК НАЗЫВАЕМЫЕ ПРОСТЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ НЕ ТАК УЖ ПРОСТЫ

Традиционное описание электрических цепей в учебных пособиях может быть подвергнуто критике, по меньшей мере, по трем причинам:

1. Знание глобальных аспектов электрических цепей как систем имеет большое значение для более глубокого понимания, но этому не придается должного значения.

2. Введение понятия «разность потенциалов» или «напряжение» как отношения энергия/заряд излишне абстрактно, так как не затрагивает вопроса поверхностных зарядов.

3. Описание электрических цепей, базирующееся на законах Ома и правилах Кирхгофа, касается исключительно установившегося режима, без упоминания о неизбежных переходных процессах.

1. ВВЕДЕНИЕ

Когда новички знакомятся с альпинизмом с целью освоения наиболее сложных элементов этого спорта, важно чтобы степень сложности тренировок тщательно выбиралась. Если планка слишком высока, из-за неудач в ходе обучения ученики могут попасть в порочный круг, в котором сомнения в своих личных способностях способствуют дальнейшим неудачам. С другой стороны, если упражнения слишком просты, начинающий альпинист может посчитать их бесполезными и ненужными.

Каждый участник группы должен достигнуть вершины с чувством гордости и удовлетворения самим собой, именно это и должно являться целью тренировок. Индивидуальный успех, дающий веру в собственные силы, может подкрепить дальнейший интерес к альпинизму. Если задачи слишком просты, начинающие альпинисты могут потерять интерес и решить заняться другим видом спорта.

Можно провести параллель и с уроками физики. Те, кто далек от альпинизма, часто считают его сложным, тяжелым и потенциально опасным видом спорта; физика среди школьных предметов может рассматриваться аналогичным образом как очень важный предмет в расписании, но при этом и самый сложный. Хорошая оценка на экзамене по физике – повод для радости, но неудача рождает чувство личной некомпетентности.

Выбор подходящего уровня сложности имеет большое значение как в физике, так и в занятиях альпинизмом. Если все, что требуется от ученика, – лишь заучивание фактов и манипуляции с несколькими уравнениями, – например, с законом Ома и правилами Кирхгофа без более глубокого понимания происходящих процессов – то ученик может потерять интерес к предмету и мотивацию к его дальнейшему изучению.

С другой стороны, если содержание курса представлено в абстрактных математических моделях, то ученики могут оказаться перегруженными, а если предмет будет им

плохо даваться, это может негативно отразиться на их способности к обучению.

Исследования, проведенные за последние 30 лет, показывают, что большинство учеников до конца не понимают даже основы так называемых простых электрических схем. Ученики с высокими оценками на экзаменах по физике часто подходят к рассмотренной задаче с теми же заблуждениями, что и раньше, вместо того чтобы использовать принципы решения, продемонстрированные во время урока [1, 2, 3].

В течение многих лет множество усилий было приложено к изучению этих заблуждений [4]. К сожалению, пока нет существенных успехов в последовательном формировании концептуальных идей, ведущих к правильному научному пониманию.

Большинство учеников не достигают целей, которые ставит перед ними преподаватель; например, существует довольно стойкое заблуждение, относящееся к току.

Мы утверждаем, что одной из причин этих заблуждений служит некоторое единообразие содержания многих учебных пособий. Степень сложности материала часто оценивается неверно, материал бывает то чрезмерно простым, то излишне сложным. Эта ошибка усугубляется и представлением материала, которое часто является неполным.

Проиллюстрируем это, сделав акцент на электрических цепях. Мы утверждаем, что материал представляется слишком простым без явного рассмотрения глобальных аспектов электрической цепи как сложной системы.

С другой стороны, материал покажется слишком сложным, если основной термин – напряжение – введен только как отношение

энергии к единице заряда, без введения понятия поверхностных зарядов.

Представление материала будет неполным, если рассматриваются только стационарные состояния (в которых применимы законы Ома и правила Кирхгофа), без рассмотрения переходных процессов, которое необходимо для более глубокого понимания процессов, происходящих в электрических цепях.

Все эти комментарии будут подробно рассмотрены в трех последовательных статьях. В них будут отмечены серьезные недостатки традиционных учебных пособий, а также будут представлены некоторые дидактические меры, которые могут помочь ученикам лучше разобраться в таком довольно сложном явлении, как «электрическая цепь».

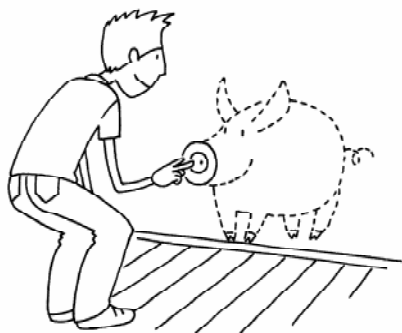
2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ КАК СИСТЕМА

2.1. МОДЕЛИ ЦЕПЕЙ ДЛЯ ПРЕПОДАВАНИЯ И ОБУЧЕНИЯ – ДИДАКТИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМА

Электрическая цепь обычно описывается в учебных пособиях как система, в которой энергия передается от источника напряжения потребителю или резистору. Этот перенос энергии сопровождается движением заряженных частиц, электронов, которые, как предполагается, дрейфуют внутри проводящих (металлических) элементов цепи. Поскольку электроны невозможно наблюдать напрямую, естественно ввести в рассмотрение некоторые аналогии или модели. Вопрос заключается в том, какие именно аналогии и модели стоит рассматривать?

Пример очень плохой аналогии можно найти в американском пособии, в котором используются следующие иллюстрации (рис. 1).

В этой модели электроны обладают собственной движущей силой, которой не существует в действительности. На отрицательном полюсе электроны видимо заряжаются пакетами энергии, которые они переносят в упорядоченной последовательности к электромотору, а затем возвращаются без энергии (и утомленными) к аккумулятору.



Одна из основных ошибок этой модели электрической цепи в том, что движущая сила, приводящая к движению в цепи, распределяется на отдельные частицы. Таким образом, скорость электрического тока, проходящего через всю цепь, видимо определяется скоростью дрейфа частиц. Но эта модель не может объяснить, почему ток распространяется со скоростью света, хотя электроны дрейфуют сравнительно медленно (а в случае переменного тока едва ли успевают поменять положение).

Подобных трудностей возникает предостаточно. Как объяснить, что в отношении переносимой энергии нет никакой разницы между прямым (от источника к потребителю) и обратным участками цепи? Почему не остается энергии в прямом участке цепи после отключения аккумулятора? Почему все частицы прекратят движение, если разомкнуть цепь на любом участке? Как частицы, движущиеся в цепи с несколькими последовательно соединенными резисторами, «узнают», какую часть энергии им нужно оставить в каждом из резисторов?

Сравнительно недавно в немецких пособиях также использовались аналогии с ложниками и грузовиками на шоссе для наглядной иллюстрации электрического тока. В этих случаях движущая сила также присваивается отдельным частицам; таким образом, все замечания, изложенные выше, остаются справедливыми и по отношению к данным примерам, а все перечисленные вопросы не получают точного научного ответа.

Несколько улучшенной моделью движения электронов в проводнике может служить система центрального отопления: источник движения приписывается не отдельной частице, а центральному приводу (водяному насосу). Это позволяет объяснить как происходит включение и выключение тока. Как только насос останавливается или включается, вся система останавливается или приходит в движение. Но опять таки, вопреки реальности, скорость переноса энергии ос-

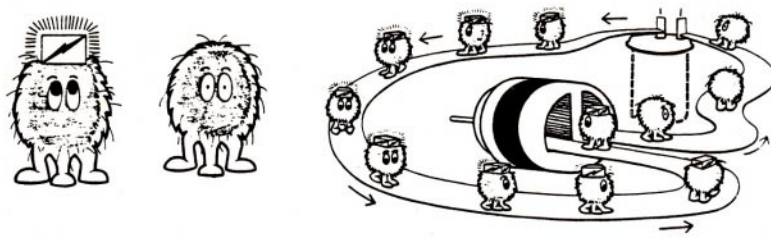


Рис. 1. Неудачная модель электрического тока. Электроны со своей собственной движущей силой (которой, конечно, не существует в действительности) переносят энергию от аккумулятора к электромотору и возвращаются без энергии

тается связанной со скоростью движения воды, и все связанные с этим вопросы не получают разумных ответов.

2.2. АДЕКВАТНЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Электроны проводимости действительно могут свободно перемещаться, но у них нет отдельного внутреннего двигателя. Перенос энергии происходит не в виде обогащенного энергией вещества, как в системе центрального отопления, кровеносных сосудах или ленточном конвейере, а посредством сил, приложенных к электронам источником напряжения (отталкивания на отрицательном полюсе и притяжения на положительном). Электроны проводимости передают эти силы существующим резисторам в цепи. Совместно с дрейфующими электронами электрическая работа выполняется внутри этих резисторов и, следовательно, осуществляется передача энергии. Немецкое слово «Kraftwerk» (буквально «завод силы»), означающее электростанцию, отражает тот факт, что на таком заводе сила прилагается именно для того, чтобы привести электроны в движение, что, в свою очередь, можно привести к определению мощности как количеству энергии в единицу времени.

Электроны проводимости могут передавать эти силы, потому что они образуют «жесткое» кольцо (жесткость в осевом направлении). Эта «жесткость» обуславливается взаимными силами отталкивания между самими электронами и силами притяжения между электронами и положительными ионами решетки проводника. Это взаимо-

действие предполагает, что любой металлический проводник строго нейтрален, и в нем нет никакого избытка или недостатка электронов. Если электроны проводимости дрейфуют, то только вместе, что гарантирует нейтральность внутри проводника в любой точке. Важно подчеркнуть слово «внутри», так как существует одно исключение, которое мы скоро рассмотрим.

Велосипедная цепь или водяной контур – последний, правда, при условии высокого давления и при относительно небольшой скорости дрейфа – могут служить подходящими моделями для электрических цепей, поскольку в обоих случаях передается сила и движение, а не обогащенное энергией вещество.

Во время занятий этот факт следует обсудить подробно. Его следует неоднократно принимать в качестве основы для интерпретации экспериментов, в отличие от неверных, но часто встречающихся моделей, перечисленных выше. Это сложная задача, требующая труда и практики, но если попытка окажется успешной, ученики смогут глубже понять процессы, происходящие в электрических цепях.

Однако, если рассматривать электрические цепи только как абстрактные системы, в которых осуществляется перенос энергии, и, если обсуждать только преобразования энергии в цепях, то невозможно дать причинное обоснование основным происходящим в электрических цепях процессам. Например, непонятно, как энергия может передаваться и в направлении движения электронов и в обратном направлении. Кроме того, невозможно ответить на вопросы, возникшие в связи с предыдущей моделью на рисунке 1. Наконец, существует риск, что представление электрического тока в виде обогащенного энергией вещества и эквивалентность потребления энергии потреблению тока могут быть восприняты без должной критики и, таким образом, могут привести к заблуждениям и ошибкам на следующих уроках.

Закон сохранения энергии не только является очень общим, но и абстрактным, поэтому в преподавании ему можно найти

очень ограниченное применение. Этот закон, как правило, применяется для описания системы, а не для объяснения происходящих в ней процессов, и здесь есть опасность, что ученики решат, будто физические законы должны быть выучены, но понять до конца их невозможно. В результате такого обучения ученики могут потерять интерес и мотивацию к изучению предмета.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

3.1. ПОТРЕБЛЕНИЕ ТОКА В СРАВНЕНИИ С ПЕРЕДАЧЕЙ СИЛЫ

Когда понятие электрической цепи вводится на начальном или среднем уровне обучения, обсуждаются условия протекания электрического тока в цепи (замкнутая цепь), различные компоненты и используемые обозначения, а также демонстрируется отличие проводников от изоляторов.

При обсуждении этой темы на более высоком уровне обучения может помочь учебная программа, разработанная на IPN в 1981 году. Хотя сейчас этот материал недоступен в своем первоначальном виде, недавно он был представлен в виде пересмотренной и укороченной интернет-версии [6].

Данная учебная программа включает в себя четыре раздела, соответствующие следующим темам:

- Электрический ток и сопротивление в параллельных и последовательных соединениях.
- Электрическое напряжение.
- Закон Ома.
- Применение правил для электрической цепи.

Материал снабжен подробными инструкциями по преподаванию и проведению практических занятий. Хотя материал представлен на немецком языке, многие данные могут быть полезны и тем, кто не владеет немецким языком. Концепция этих рекомендаций основана на том, что есть большая разница между бытовым понятием мощности/потребления тока и тем, что в действительности происходит внутри электрической цепи.

- В бытовом понимании потребление мощности/электрического тока представляет собой передачу энергии как некоторого

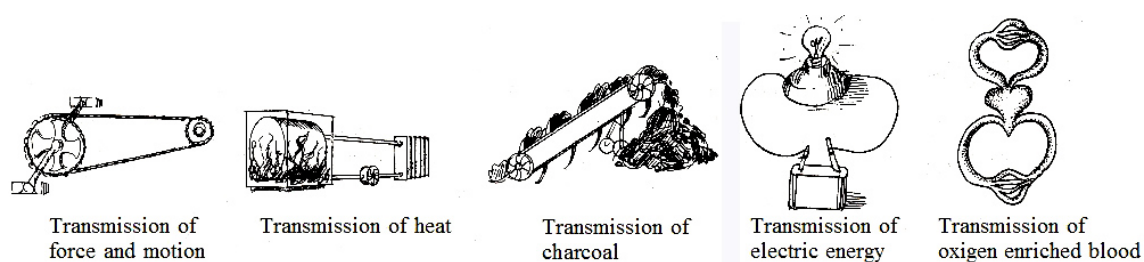


Рис. 2. Различные системы для передачи энергии

вещества или как свойства некоторого передаваемого вещества. С этой точки зрения, перенос энергии (или вещества, обогащенного энергией) происходит от источника через проводники к резисторам без каких-либо отражений в соединениях в системе. При таком представлении невозможно вывести необходимые правила и факты (например, то, что на самом деле потребления тока нет), но выучить их нужно.

- Передача энергии в реальной электрической цепи совершенно иная. Важной особенностью электрической схемы является своего рода силовое замыкание, возникающее между источником и потребителем, в то время как энергия передается за счет движения вдоль контура связанных в кольцо электронов. Термин «силовое замыкание» используется для жесткого соединения, где могут быть применены силы притяжения и отталкивания.

Необходимо некоторое системное мышление, при котором вся система и ее силовое замыкание хранятся в активной памяти. Если это возможно, то все остальные правила и законы выводятся без каких-либо дополнительных предположений.

3.2. НЕРАЗВЕТВЛЕННЫЕ ЦЕПИ

Ввиду всего вышесказанного, предполагается, что изучение электрических цепей начинается с широкого введения в системы передачи энергии, сужающегося на первом занятии до рассмотрения неразветвленных цепей. Во время этого занятия следует выделить особое свойство велосипедной цепи в качестве модели для электрической цепи, по сравнению с моделями, в которых энергия переносится с помощью вещества (рис. 2).

Все ученики знакомы с устройством велосипеда, и эта модель будет полезна, чтобы подчеркнуть важное различие между передачей энергии в виде силы и движения и передачей энергии в виде вещества [7].

В случае велосипедной цепи, однако, только одна сторона находится в натянутом состоянии. Поэтому проявляется ясное различие между натянутой стороной и провисающей частью, звенья которой возвращаются к источнику энергии. Это иллюстрирует ограниченность данной модели, так как аккумулятор взаимодействует симметрично с обоими подключенными проводами.

Жесткое кольцо, которое можно тянуть и толкать, устраняет этот недостаток и лучше подходит для того, чтобы подвести учащихся к правильной картине электрической цепи.

При разработке методических рекомендаций IPN была предложена улучшенная альтернатива модели на рис. 1, в описании которой прежде всего следует подчеркнуть, что частицы образуют собой взаимосвязанное кольцо, которое аккумулятор может тянуть и толкать (рис. 3).

Наш опыт показал, что ученикам трудно увидеть принципиальную разницу между этими двумя моделями. Одна из причин это-

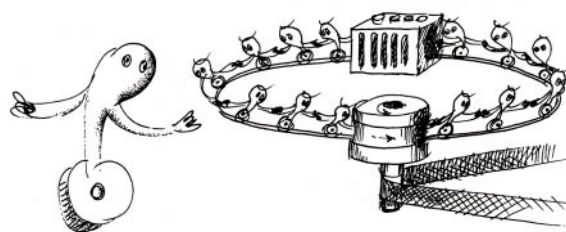


Рис. 3. Улучшенная модель электрической цепи, в которой подчеркнута взаимосвязь между частицами и внешней силой

го может заключаться в том, что систему, в которой передается вещество, можно анализировать последовательно; такой тип мышления наиболее знаком ученикам и именно его они используют при изучении электрических цепей. Они смотрят на ток, генерируемый источником и проходящий различные резисторы один за другим. С этой точки зрения кажется вполне естественным, что условия на соединениях резистора отличаются (если резистор и не потребляет ток, то, по крайней мере, потребляет энергию).

Тем не менее, для такой системы, как электрическая цепь, где энергия передается в виде силы и движения, мало подходит последовательный анализ. В частности, при наличии нескольких резисторов должны учитываться и взаимодействие всех частей системы и система в целом.

Чтобы не давать повода к последовательному анализу цепей, лучше не прибегать к описанию электрического тока как движения электронов по цепи друг за другом (рис. 4), лучше подчеркнуть, что все элементы движутся одновременно (рис. 5).

Чтобы ученики лучше поняли разницу между этими двумя моделями, можно организовать серию ролевых игр [8].

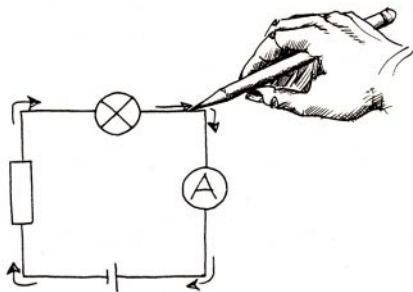


Рис. 4. Электроны движутся по электрической цепи друг за другом

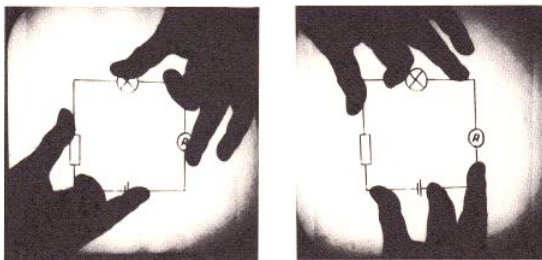


Рис. 5. Все электроны движутся одновременно как взаимосвязанное кольцо

В первом туре игры каждый ученик должен передать чашку своему ближайшему соседу. Один из учеников берет на себя роль источника и заполняет чашку «веществом, переносящим энергию» (монетами, конфетами). Другой ученик играет роль потребителя или резистора и опустошает чашку, когда она переходит к нему, после чего выполняет некоторую заданную «работу» (рис. 6).

Чтобы оценить корректность данной модели, можно задать ученикам следующие вопросы:

1. Когда «источник» начинает заполнять чашки и они начинают двигаться по кругу, пройдет некоторое время, прежде чем вещество вместе с энергией достигнет «потребителя». Согласуется ли это с реальностью?

2. Согласуется ли с реальностью то, что, когда «потребитель» опустошает очередную чашку, в части схемы все еще остается энергия?

3. Согласуется ли с реальностью то, что энергия содержится только в чашках, передающихся в прямом направлении, а в обратном направлении всегда передаются только пустые чашки?

4. Если один из игроков, передающих чашки в обратном направлении, выйдет из игры, то в прямом направлении чашки по-прежнему какое-то время будут передаваться. Происходит ли то же самое в действительности? и т. д.

В отличие от модели передачи энергии с помощью вещества, жесткое кольцо (напри-



Рис. 6. Неудачная модель «Вещество, переносящее энергию»

мер, обруч) можно использовать для демонстрации того, как удаленно осуществляется работа посредством передачи силы и движения. Такое кольцо могут держать несколько учеников, создавая минимальное трение, в то время как один из учеников будет толкать и тянуть его, а другой, на противоположной стороне, будет выполнять некоторую «работу» (рис. 7).

Рассматривая данную модель, можно задать ученикам аналогичные вопросы, но на этот раз модель будет лучше отвечать реальным процессам.

В ходе игр ученики должны усвоить, что электрическую цепь можно описать абстрактно с помощью следующих трех представлений:

- источника (привода), передающего энергию системе,
- потока вещества в виде замкнутого контура,
- препятствия, в котором энергия удаляется из системы, что можно проиллюстрировать рисунком 8.

Такое представление можно использовать также и для цепи с переменным током. Считая, что трансформатор аналогичен коробке передач (преобразует большую силу и маленькое перемещение в маленькую силу и большое перемещение, и наоборот), можно представить электрическую цепь переменного тока, содержащую трансформатор следующим образом (см. рис. 9).

Основная идея такой модели заключается в том, что в каждый момент времени все части системы связаны между собой некоторым напряжением, вызванным движущей силой, с одной стороны, и препятствием, с другой.

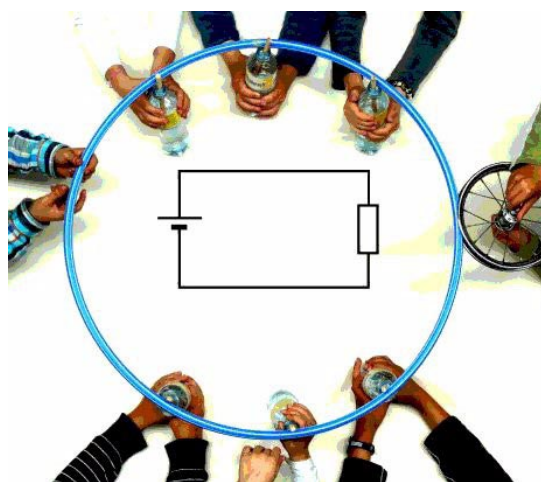


Рис. 7. Более корректная модель

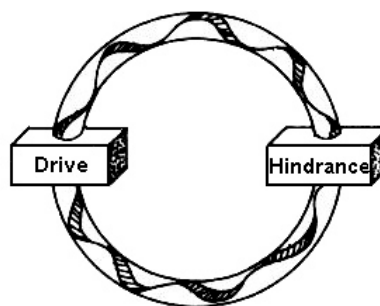


Рис. 8. Аналогия электрической цепи без ветвления

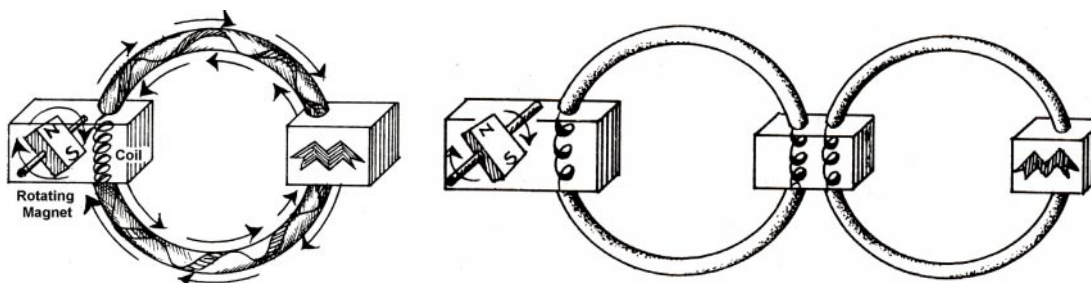


Рис. 9. Представление цепи переменного тока с подключением и без подключения трансформатора

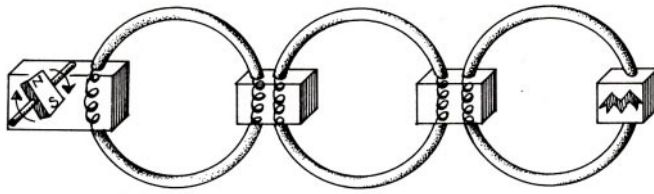


Рис. 10. Представление взаимодействия между электростанцией и потребителями

Наконец, таким же образом может быть представлена и система поставки электроэнергии, где потери на линиях электропередач уменьшаются за счет двойного преобразования напряжения, сначала к высоким значениям, а потом – к низким, и противоположных преобразований тока (рис. 10).

В данном случае основная идея также заключена в том, что все эти различные системы образуют одну совместную систему, к которой источник и потребитель прикладывают тянущую и толкающую силы.

3.3. ЦЕПИ С ВЕТВЛЕНИЕМ

Модели велосипедной цепи и жесткого кольца не подходят, если речь идет об электрических цепях с параллельным соединением. Для описания такой цепи можно использовать замкнутую систему, заполненную жидкостью, при условии, что выполнены следующие условия:

1. В замкнутой системе происходит только ламинарное течение без турбулентности.

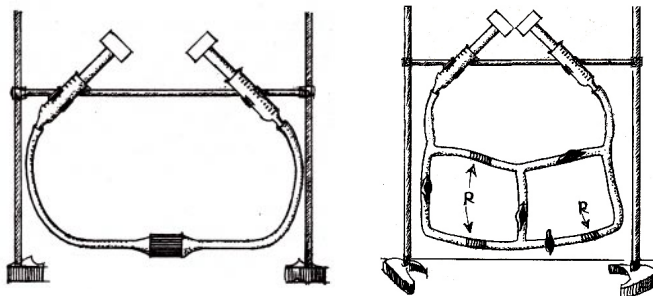


Рис. 11. Модель со шприцем в качестве замкнутого контура

2. Кинетическая энергия жидкости должна быть незначительна, то есть должна быть мала скорость дрейфа.

3. Так как скорость дрейфа мала, для достижения разумной скорости передачи энергии, должен быть высокий перепад в давлении между частями системы.

Сложно реализовать систему, удовлетворяющую данным условиям. В ходе ее реализации и оценки в IPN была предложена так называемая «модель со шприцем»

(рис. 11).

Если считать, что жидкость перемещается в шприцах непрерывно, то можно получить квази-замкнутую систему, аналогичную электрической цепи, в которой стационарный ток может протекать в течение короткого периода времени.

Достоинством такой модели является то, что ученики могут прикладывать к шприцам силу различной величины и увидеть разницу в сопротивлении между последовательно и параллельно подключенными резисторами. Дополнительно это отличие можно продемонстрировать, если изменить модель и провести измерения периода времени вытеснения жидкости и вытесненного объема при заданном весе (рис. 12).

Опыт, полученный на различных этапах оценки данной модели, показал, что введение водного тока оказалось полезным для учеников, так как это конкретный объект, создающий аналогию с абстрактным потоком электронов внутри электрической цепи.



Более ранние исследования, тем не менее, выявили ограниченность такой модели [9]. Понимание условий протекания воды в параллельных и последовательных соединениях замкнутого контура отнюдь не становится тривиальной задачей, благодаря конкретности такой системы. Глубокого понимания происходящих процессов можно добиться путем оценки значений давлений, но это, как правило, бывает слишком сложно для учеников.

Чтобы помочь ученикам полностью разобраться в этом вопросе, можно провести следующий эксперимент. Велосипедная трубка подсоединяется к крану, и вода пропускается через узкое сечение (рис. 13).

Благодаря эластичности трубки, можно видеть, что в ней не создается никакого переполнения и заторов, как иногда предполагают ученики.

В аналогичном эксперименте можно продемонстрировать, что, вопреки частому заблуждению, давление в точке ветвления не уменьшается, а остается неизменным (рис. 14).

Важнее объяснить распределение давления в ламинарном потоке, чем просто измерить его. Во-первых, ученики должны признать, что вода сжимаема, вопреки распространенному мнению, что она несжимаема. Чтобы отказаться от этого заблуждения, стоит обратиться к тому факту, что, если бы вода была несжимаемой, то поверхность мирового океана поднялась бы на 40 метров, но этого не происходит, так как вода сжимается под действием собственного веса.

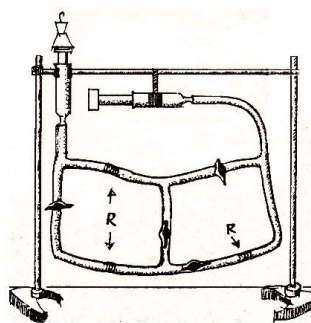


Рис. 12. Изменение модели в целях измерения тока (вес, вытесненный объем, период времени) замкнутого контура

Ламинарный поток может протекать через узкое сечение или резистор только при наличии большого перепада давления. Это происходит потому, что вода сжимается в разной степени на входе и выходе резистора и реагирует в соответствии с упругими силами. Это означает, что на выходе из резистора плотность воды немного меньше, а скорость дрейфа немного больше, чем на входе.

Разница между входом и выходом достаточно мала, но ею все же нельзя пренебречь. В самом деле, существование этой разницы – единственный способ объяснить устойчивый перепад давления в ламинарном потоке.

После объяснения этих фактов становится понятно, почему при последовательном соединении резисторов не возникает условия узкого горлышка. Эффект узкого горлышка проявляется, например, в потоке дорожного движения, в котором основным фактором является общее количество авто-



Рис. 13. Ток воды через эластичную трубку с узким сечением

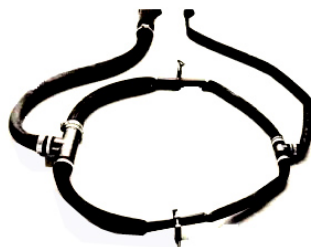


Рис. 14. Ток воды в эластичной трубке с параллельным соединением двух участков с узкими сечениями



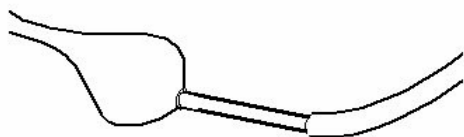


Рис. 15. Ток воды через эластичную трубку с узким сечением, как его часто рисуют ученики

мобилей, проходящее в единицу времени. В случае замкнутого водяного контура каждому резистору необходим перепад давления, чтобы поддерживался постоянный ток воды.

Таким же образом объясняется и одинаковая разность давлений на параллельных резисторах, даже если их сечения различны.

Ученики обычно не знают о связи между давлением и сжимаемостью воды, поэтому применение моделей с использованием водного тока будет оставаться ограниченным, пока водяное давление и связанные с ним вопросы не будут изучаться подробно.

Сложности, которые испытывают ученики при работе с такими моделями, становятся очевидными, когда учеников просят изобразить ток воды через эластичную трубку с узким сечением. Многие ученики считают правильным рис. 15.

Литература

1. Wiesner H., Jung W., Kiowski I., Weber E. (1982): Zur Einfuhrung von Stromstarke und Spannung. Naturwissenschaft im Unterricht P/C. P. 388–394.
2. v. Rhoneck C., Volker B. (1982): Einfache Elektrizitatslehre zwischen physikalischem Anspruch und Lernschwierigkeiten. Naturwissenschaft im Unterricht P/C 30, P. 406–412.
3. Symposium «Research as a guide to improving university-level instruction on electricity and magnetism»; GIREP-Conference 201.
4. Muller R., Wodzinski R., Hopf M. (2004): Schulervorstellungen in der Physik. Aulis Koln.
5. Florida State University (1970): Probing the Natural World. Intermediate Science Curriculum Study, Silver Burdett Company.
6. Hartel H. (1981): IPN-teaching Unit «Stromstarke (Current), Spannung (Voltage), Widerstand (Resistance)» for grade 7 and 8, Klett (Updated and shortened edition (in German) available under: (<http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/PUB/Stromkreis.htm>).
7. A similar approach by using a conveyer belt was proposed by Muckenfu?, H. (1992): Neue Wege im Elektrizitatunterricht. Aulis Verlag.
8. A video, showing students playing this game, is found under: <http://www.astrophysik.unikiel.de/~hhaertel/PUB/role-play.htm>.
9. Schwedes H., Dudeck W.-G., Seidel C. (1995): Elektrizitatslehre mit Wassermodellen. Praxis der Naturwissenschaften 2/44. P. 28–36.

Нельзя сказать, что этот рисунок будет верен, если мы рассматриваем только начальные процессы. После того как пускаем в контур воду, в узких сечениях возникают мгновенные заторы, вызывающие отражения и, в конце концов, ведущие к стационарному состоянию, при котором давление в обеих частях трубки постоянно. Такой рисунок не стоит сразу исключать из рассмотрения. Он может быть в дальнейшем использован в качестве отправной точки при разговоре о стационарных состояниях и переходных процессах.

Знание связи между давлением и сжимаемостью жидкости помогает понять не только процессы в водных контурах, но и связь между напряжением и поверхностными зарядами. В этом случае термин «напряжение» можно лучше объяснить, если рассматривать электроны проводимости как своего рода «электронный газ» с определенной сжимаемостью. При подаче напряжения дополнительные заряды размещаются на поверхности проводника, препятствуя дальнейшему сжатию «газа».

Все упомянутые соотношения, а также предложения для проведения занятий в классе, будут описаны в следующей статье.



Наши авторы, 2013.
Our authors, 2013.

Dr. Herman Hartel,
*Университет им. Христиана
Альбрехта, г. Киль, Германия.*

*Перевод с нем. Курбатовой М.А.
под ред. Бутикова Е.И.*