

Демон Андреева — действующий аналог демона Максвелла

Андреев Юрий Петрович, независимый исследователь
пгт Куминский

Аннотация. В 1867 году английский физик Д.К. Максвелл придумал мысленный эксперимент с мифическими демонами с целью проиллюстрировать кажущийся парадокс второго начала термодинамики. В 1929 году Л. Сциллард предложил вариант двигателя с одной молекулой, который как бы мог нарушить второе начало. В "Фейнмановских лекциях по физике" Р.Ф. Фейнманом также был предложен вариант двигателя в виде храповика с собачкой, как вариант устройства, как бы нарушающего второе начало. Но все эти предложенные варианты так и не были созданы в виде реальных устройств. В данной статье рассматривается устройство - "демон Андреева". Это устройство является полным аналогом множества демонов Максвелла. То есть, это устройство пропускает отдельные молекулы с одной стороны стенки и не пропускает с другой. И конструкция этого устройства настолько проста, что его несложно изготовить в наше время. В результате появиться реальная возможность подтвердить или опровергнуть второе начало термодинамики.

Ключевые слова: «демон Андреева», демон Максвелла, второе начало термодинамики.

Abstract. In 1867, English physicist D.K. Maxwell devised a thought experiment using mythical demons to demonstrate an apparent paradox of the second law of thermodynamics. In 1929, L. Scillard offered a one-molecule engine version that could supposedly break the second law. In "The Feynman Lectures on Physics", R.P. Feynman offered a ratchet-and-pawl engine version that could also hypothetically break the second law. However, all of these versions were not real, created devices. This article discusses a device - "Andreev's Demon". This device is a complete analogue of the Maxwell's Demons; that is, this device allows separate molecules to pass through a wall from one side without allowing them to pass through from the other side. The design of this device is so simple that it is now easy to construct. As a result, we will have a genuine opportunity to confirm or disprove the second law of thermodynamics.

Keywords: «Andreev's Demon», Maxwell's Demon, the second law of thermodynamics

У Максвелла демон сидел у закрытой дверцы и сортировал молекулы по скоростям. В результате в одной половине сосуда собирались «горячие» молекулы, а в другой половине — «холодные». Но можно немного изменить алгоритм работы демона Максвелла. Пусть демон сидит у дверцы и открывает ее, когда с одной стороны к ней подлетает любая молекула, независимо от того, «горячая» она или «холодная». Когда к дверце подлетает молекула с другой стороны, то демон дверцу не открывает и молекула не может пролететь через отверстие. Можно и наоборот. Демон сидит у открытой дверцы. Когда к отверстию подлетает молекула с одной стороны, то демон дверцу не закрывает и молекула свободно пролетает через отверстие. Но когда к отверстию подлетает молекула с другой стороны, то демон дверцу закрывает и не пропускает молекулу через отверстие. То есть, молекулы с одной стороны будут пролетать через отверстие с дверцей, которой управляет демон, а молекулы с другой стороны пролетать не будут. В результате давление в одной половине сосуда увеличится, а в другой половине - уменьшится. Получившуюся разность давлений также можно использовать для совершения полезной работы. И это также будет нарушать второе начало термодинамики.

Допустим, что есть пластина с отверстиями и дверцами у отверстий. И этими дверцами управляют демоны Максвелла. Если пластина с такими демонами будет находиться в открытом газовом пространстве, то давление газа с той стороны пластины, с которой демоны пропускают молекулы через отверстия, будет меньше, так как площадь пластины для молекул с этой стороны будет меньше на суммарную площадь отверстий в пластине. Часть молекул, попадающих в створ отверстий, будут пролетать на противоположную сторону, так как демоны будут открывать дверцы перед молекулами с этой стороны. То есть, молекулы будут ударяться только в саму мембрану, но не в дверцы отверстий. Давление с противоположной стороны

не изменится, так как демоны не открывают дверцы перед молекулами с этой стороны. То есть, все молекулы ударяются и отскакивают как от самой пластины, так и от закрытых дверок на отверстиях.

Допустим, что у самой поверхности пластины с обеих сторон установлены приборы, которые фиксируют молекулы, которые двигаются в сторону пластины и от неё. Фиксация молекул происходит на очень небольшом расстоянии от пластины, меньше длины свободного пробега молекул. Когда демоны не работают, тогда количество молекул, двигающихся в сторону пластины, будет равно количеству молекул, двигающихся от неё. То есть, все молекулы, двигавшиеся к пластине, ударились и отскочили от неё или закрытых дверок на отверстиях. И такой результат будет с обеих сторон пластины. Когда же демоны заработают, то картина изменится. С одной стороны пластины прибор зафиксирует уменьшение количества молекул, двигающихся от пластины, так часть молекул пролетают через отверстия, дверцы в которых открывают демоны. С другой стороны пластины прибор зафиксирует увеличение количества молекул, летящих от пластины. С этой стороны все молекулы, которые двигались к пластине, ударились и отскочили от пластины или дверок, так как демоны не открывают дверцы перед молекулами с этой стороны. К этим отскочившим молекулам добавляются молекулы, которые демоны пропустили с противоположной стороны. В результате количество молекул, двигающихся от пластины становится больше, чем молекул, двигающихся к пластине.

Для лучшего понимания конструкции «демона Андреева» цитата из "Общего курса физики" Сивухина Д.В. [1, стр. 353] про эффузию в разреженном газе.

Поток молекул газа через отверстие в стенке называется эффузионным потоком, если размеры отверстия и толщина стенки малы по сравнению с длиной свободного пробега λ .

Допустим теперь, что по разные стороны перегородки находится один и тот же газ, но при разных давлениях и температурах. Если газ находится в состоянии высокого вакуума, то возникнут два диффузионных потока: из А в В и из В в А. Ввиду отсутствия столкновений между молекулами, эти два потока совершенно независимы друг от друга. Поэтому количество молекул, ежесекундно проходящих через отверстие s из А в В, определяется выражением

$$N = \frac{Cs}{\sqrt{m}} \left(\frac{P_A}{\sqrt{T_A}} - \frac{P_B}{\sqrt{T_B}} \right),$$

где P_A, P_B, T_A, T_B — давления и температуры газа в А и В. В состоянии равновесия, когда средние числа молекул в А и В остаются неизменными, должно быть $N=0$, т.е.

$$\frac{P_A}{\sqrt{T_A}} = \frac{P_B}{\sqrt{T_B}}.$$

Тут надо различать эффузионный поток молекул и газодинамический поток газа. Отверстие мало по сравнению с длиной свободного пробега молекул. Через такое отверстие могут пролетать только отдельные молекулы, которые двигаются в сторону мембраны. Молекулы, движущиеся параллельно стенке не могут пролететь через отверстие. Молекулы, двигающиеся от стенки, также не могут пролететь через отверстие. И, это самое главное, молекулы вылетают через отверстие поодиночке. В газодинамическом потоке газа, выходящем через большое отверстие, множество молекул двигаются по всем возможным направлениям. И скорость этого потока равна векторной скорости всех молекул этого потока. В этом случае говорить об какой-то отдельной молекуле бессмысленно.

При равных давлениях и температурах, эффузионные потоки из А в В и из В в А равны. Если давление газа со стороны А увеличить, то и эффузионный поток молекул из А в В также увеличится. Эффузионный поток из В в А останется без изменений. А вот конструкция устройства «демон Андреева». См. рис. 1.

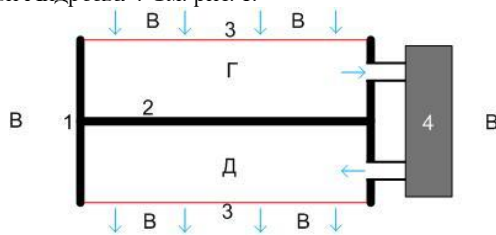


Рис. 1.

1 - сосуд, 2 — непроницаемая стенка, разделяющая сосуд на две части Г и Д, 3 - мембрана с микроскопическими отверстиями, 4 - вакуумный насос. В - газовая среда вокруг сосуда.

Площадь и количество отверстий в обеих мембранах равны. Толщина мембран и размер отверстий в них малы по сравнению с длиной свободного пробега молекул. Это и есть «демон Андреева». Как видно из рисунка, его конструкция очень проста и вполне может быть создана в современных условиях. Как же работает этот демон?

Пусть этот демон находится в вакууме. Предположим, что снаружи у верхней и нижней мембран находятся приборы, фиксирующие количество молекул, двигающихся к мембранам и от них. Первоначально давления и температура газа внутри сосуда и снаружи равны. Эффузионные потоки: из В в Г, из Г в В, из В в Д, из Д в В — равны. Кроме эффузионных потоков молекул через отверстия, есть ещё наружные молекулы, которые ударяются в наружные

поверхности мембран и отскакивают от них. Но количество таких молекул, двигающихся к мембране, всегда равно количеству молекул, двигающихся от неё. Так как площади мембран, количество отверстий в мембранах и наружное давление равны, то и количество таких молекул с обеих сторон также равны. Для простоты такие молекулы не будем учитывать в последующих рассуждениях. То есть, когда давления в частях Г, Д и В равны, то приборы зафиксируют равенство молекул, двигающихся к мембранам и двигающихся от них. Это тот случай, когда демоны как бы не работают.

Включим вакуумный насос 4, который будет откачивать газ из части Г в часть Д. В результате давление в части Г уменьшится относительно внешнего давления В. Так как газ из части Г откачивается в часть Д, то давление в части Д увеличится относительно внешнего давления В. Поскольку давление в Г уменьшилось, то уменьшается и эффузионный поток из Г в В. Эффузионный поток из В в Г остаётся неизменным, так как внешнее давление не изменилось. В результате прибор у верхней мембраны зафиксирует уменьшение молекул, двигающихся от мембраны, так как уменьшился эффузионный поток из части Г в В. Результат, аналогичный показаниям прибора у пластины, с работающими, мифическими демонами Максвелла с той стороны пластины, с которой демоны пропускают молекулы.

Так как в части Д давление увеличилось, то увеличился и эффузионный поток из Д в В. Эффузионный поток из В в Д не изменился, так как внешнее давление не изменилось. В результате прибор у нижней мембраны зафиксирует увеличение количества молекул, двигающихся от мембраны, так как увеличился эффузионный поток из Д в В. Результат также аналогичный показаниям прибора у той стороны пластины, со стороны которой демоны не пропускают молекулы. Внешнюю поверхность верхней мембраны можно представить как ту поверхность пластины с демонами Максвелла, со стороны которой демоны пропускают молекулы, открывая дверцы. Внешнюю поверхность нижней мембраны можно представить как ту сторону пластины с демонами Максвелла, со стороны которой демоны молекулы не пропускают. И не важно, что толщина сосуда превосходит толщину пластины с демонами Максвелла, результат в обоих случаях идентичен.

В результате работы вакуумного насоса установится динамическое равновесие. Насколько больше молекул станет влетать через верхнюю мембрану, настолько же больше молекул будет вылетать через нижнюю мембрану. Например, до включения вакуумного насоса все эффузионные потоки через каждое отверстие были равны 10 молекулам, так как давления в В, Г и Д были равны. После включения насоса потоки стали примерно такими. Из В в Г — 10 молекул, так как внешнее давление не изменилось. Из Г в В — 8 молекул, так как давление в части Г уменьшилось. Из Д в В — 12 молекул, так как давление в части Д увеличилось. Из В в Д — 10 молекул, так как внешнее давление не изменилось. То есть, через верхнюю мембрану в часть Г влетает на $10 - 8 = 2$ молекулы больше, чем вылетает. Через нижнюю мембрану из части Д вылетает на $12 - 10 = 2$ молекулы больше, чем влетает. Эти 2 влетевшие молекулы и 2 вылетевшие молекулы можно представить как 2 молекулы, которые пролетели через сосуд навстречу, не взаимодействуя с сосудом. Примерно так же, как пролетают молекулы через отверстия пластины, дверцы которых открыли демоны перед этими молекулами. В

результате эти пролетевшие молекулы не оказали воздействие на пластину. То есть, как и в случае с пластиной с демонами Максвелла, эти 2, как бы пролетевшие через сосуд молекулы, не оказали воздействие на сосуд. И поэтому внешнее давление на сосуд сверху уменьшится. А давление на сосуд снизу не изменится. В результате на сосуд снизу будет действовать некоторая сила, как на пластину с мифическими демонами. Эта сила будет зависеть от количества пролетающих через сосуд молекул. А количество пролетающих молекул будет зависеть от разности давлений В и Г, В и Д, А также от количества отверстий в мембранах.

Допустим, есть сосуд, в котором одна стенка — это стенка с демонами Максвелла. Когда демоны пропускают молекулы внутрь сосуда, то давление внутри растёт и газ через большое отверстие выходит наружу. Когда же демоны пропускают молекулы из сосуда наружу, то давление внутри падает и окружающий газ через большое отверстие попадает в сосуд. Оба этих варианта также несложно сделать. См. рис. 2.

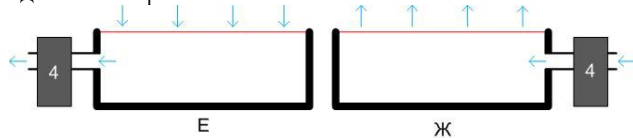


Рис. 2.

Вариант Е эквивалентен тому варианту, когда демоны Максвелла пропускают молекулы внутрь сосуда. В этом варианте вакуумный насос 4 откачивает газ из сосуда наружу. В сосуде с демонами больше молекул пролетает внутрь — здесь тоже больше молекул пролетает внутрь. В сосуде с демонами газ выходит из сосуда — здесь тоже газ выходит из сосуда. Если насос спрятать внутри сосуда, то внешне не отличить — где сосуд с демонами, а где его работающий аналог. Вариант Ж соответствует варианту, когда демоны пропускают молекулы из сосуда наружу. В этом варианте насос 4 закачивает внешний газ внутрь сосуда и поэтому больше молекул вылетает из сосуда через мембрану. И этот вариант является полным аналогом сосуда с демонами.

Как пишет Сивухин Д.В. [1, стр. 188], взаимодействие молекулы со стенкой можно мысленно разделить на 2 этапа. На первом этапе молекула тормозится стенкой, останавливается и как бы прилипает к стенке. При этом на стенку действует сила F_1 . На втором этапе молекула отталкивается стенкой, ускоряется и отскакивает от стенки. При этом на стенку действует сила F_2 . Эта сила подобна силе отдачи при выстреле из орудия, где роль снаряда играет отскакивающая молекула. На самом деле эти 2 этапа происходят одновременно и создают результирующую силу $F = F_1 + F_2$. Сосуды на рис. 2 позволяют разделить взаимодействие молекулы со стенкой на 2 отдельных этапа. Рассмотрим вариант Ж на рис. 2. Когда насос не работает, то эффузионные потоки молекул через отверстия мембраны равны. Все силы компенсируются. Если включить насос, то давление внутри сосуда увеличивается относительно внешнего давления. Соответственно, эффузионный поток молекул из сосуда станет больше. Например, когда насос не работал, то вылетало и влетало по 10 молекул через каждое отверстие. Насос заработал. Вылетать стало 12 молекул, а влетать также 10 молекул. Через каждое отверстие стало вылетать на 2 молекулы больше. Эти 2 молекулы подобны снарядам, вылетающим из орудия. Молекулы на втором этапе отскакивают от стенки с тепловой скоростью v . Две молекулы также вылетают с тепло-

вой скоростью v . Массы молекул равны, скорости равны. Поэтому и силы от вылетающих молекул равны F_2 , как на втором этапе. Но если сила при отскоке молекулы действует на стенку, то при вылете молекулы, сила действует не на мембрану, а на внутреннюю поверхность противоположной мемbrane стенки. Но это не важно, так как мембрана и сосуд — это единое целое.

Аналогично всё происходит и в варианте Е на рис. 2. Например, первоначально через каждое отверстие влетало и вылетало по 10 молекул. Когда насос работает, то давление внутри уменьшается и только 8 молекул вылетает из сосуда. То есть, в сосуд влетает на $10 - 8 = 2$ молекулы больше. Эти 2 влетевшие молекулы также можно представить в виде 2-х прилипших к стенке молекул, как на первом этапе. Они не отскочили и стали частью сосуда. Поэтому и сила, действующая на сосуд от влетающей молекулы равна F_1 . Эта сила так же действует не на мембрану, а на внутреннюю поверхность противоположной стенки.

Если соединить эти 2 сосуда стенками, а насос будет перекачивать газ из одного сосуда в другой, то получится устройство, как на рис. 1. Если при ударе и отскоке молекулы от стенки силы F_1 и F_2 складываются, то в данном случае силы вычитаются. Сила F_1 , от влетающих в верхнюю часть сосуда молекул, действует на непроницаемую стенку 2 вниз. Сила F_2 , от вылетающих из нижней части сосуда молекул, действует на непроницаемую стенку 2 вверх. Результирующая сила $F = F_1 - F_2 = 0$. То есть, влетающую и вылетающую молекулы можно представить одной молекулой, которая как бы пролетела через сосуд и не оказала на него воздействие.

Поэтому можно точно сказать, что «демон Андреева» является полным, действующим аналогом мифических демонов Максвелла. Причём этот демон не нарушает никаких законов физике. Если в случае с демонами Максвелла непонятно, за счёт какой энергии работают эти самые мифические демоны, то в случае с «демоном Андреева» всё ясно. Этот демон работает за счёт разности давлений. Чем больше разность давлений — тем больше молекул пролетает. То есть, энергии больше — больше молекул демон пропускает. Нарушения закона сохранения энергии тоже нет. А результатом работы данного демона является некоторая сила, которую можно применить для создания разности давления, которая необходима для работы данного демона И, при определённых условиях, сила от работы данного демона может быть больше, чем сила, необходимая для создания разности давлений, необходимой для работы демона. Этот вариант рассмотрен в статье «Двигатель Андреева и его термодинамический цикл» [2]. Этот демон также может быть использован для создания движущей силы в газовой среде. Этот вариант рассмотрен в статье «Принцип полёта НЛО в атмосфере Земли» [3].

Как пишет Сивухин Д.В., толщина и размер отверстий должны быть малы по сравнению с длиной свободного пробега молекул. Длина свободного пробега молекул при температуре 25°C и нормальном давлении порядка 70 нм. То есть, если толщина мембраны и размер отверстий будет порядка нескольких нанометров, то эффузионные потоки молекул через отверстия такой мембраны будут также независимы и при нормальных условиях, а не только в вакууме. Уже в лабораторных условиях изготавливают мембраны толщиной в 1 атом [4]. Возможно, что и отверстия в несколько нанометров уже могут делать. А это значит, что «демон Андреева» будет работать и при нормальных условиях.

Литература:

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 2. ФИЗМАТЛИТ. 2005 г.
2. <http://www.i-r.ru/?p=dvigatel-andreeva-i-ego-termodinamicheskij-tsikl>
3. <http://www.i-r.ru/?p=printsip-pol%D1%91ta-nlo-v-atmosfere-zemli>
4. <http://www.membrana.ru/particle/12885>