

Низко-температурная электрогенерация

Рецензия эксперта на статью получена 07.05.2020 [Expert review on the article received on May 7, 2020].

Во все времена крайне актуальна задача извлечения энергии во всех её видах и применение этой энергии всеми возможными способами для решения важнейшей задачи — развития человечества. Научная мысль всегда работала и работает в направлении понимания сущности энергии. Тенденция развития современного мира медленно, но неуклонно ориентируется в сторону безотходных, возобновляемых источников энергии, таких как солнечное излучение, грунтовые, воздушные и водные энергетические ресурсы.

Далее будет рассмотрена теория энергии в аспекте движения корпускул материи и предложена экспериментально доказанная возможность высокоэффективной генерации электрической энергии из низкотемпературных источников.

Наиболее обоснованно и фундаментально к этой задаче подошёл физик, математик, механик и астроном Исаак Ньютон, один из создателей классической физики и автор фундаментального труда «Математические начала натуральной философии», в котором Ньютон изложил закон всемирного тяготения и три закона механики, ставшие основой классической механики.

Новое понимание предложил великий русский учёный М.В. Ломоносов, который убрал лишнее понятие «теплорода» и представил понятие «теплоты» следующим образом:

1. «В движении какой-то материи», так как «при прекращении движения уменьшается и теплота», а «движение не может произойти без материи».
2. «Во внутреннем движении материи», так как это «недоступно чувствам».
3. «Во внутреннем движении собственной материи» тел, то есть «не посторонней».

4. «Во вращательном движении частиц собственной материи тел», так как «существуют весьма горячие тела без двух других видов движения — внутреннего поступательного и колебательного», например, раскалённый камень покоится (нет поступательного движения) и не плавится (нет колебательного движения частиц).

Термодинамика — раздел физики, изучающий наиболее общие свойства макроскопических систем и способы передачи и превращения энергии в таких системах. Она появилась как эмпирическая наука об основных способах преобразования внутренней энергии тел для совершения механической работы

М.В. Ломоносов доказал, что причиной «теплоты» является «внутреннее вращательное движение связанной материи», что полностью соответствовало физике Ньютона. Почти одновременно в США и на Западе понятие «теплоты» было осмыслено учёным и изобретателем Бенджамином Томпсоном (графом Румфордом) и физиком и химиком сэром Гемфри Дэви.

Термодинамика появилась как эмпирическая наука об основных способах преобразования внутренней энергии тел для совершения механической работы. Первая паровая машина была построена ещё в XVII веке французским физиком Дени Папеном, а во второй половине XVIII века паровые агрегаты усовершенствовали Джеймс Уатт и другие изобретатели, чем и ознаменовалось наступление промышленной революции.

УДК 620.97. Научная специальность: 05.14.08.

Низкотемпературная электрогенерация

С. Г. Баякин, к.т.н., академик Международной академии экологии и безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ), руководитель проекта, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ «КНЦ СО РАН», г. Красноярск)

В работе рассмотрены исторические и современные представления о природе процессов трансформации энергии в границах материи и движения, проанализированы четыре начала термодинамики, дана оценка актуальным попыткам технической реализации виртуального эксперимента «демон Максвелла». Приведены теоретические расчёты, показано экспериментальное подтверждение теоретических обоснований на созданном экспериментальном экземпляре устройства, работающего на реальном объекте по принципу «демона Максвелла». Обозначены перспективы развития низкотемпературной электрогенерации. Теоретически обоснована и предложена новая трактовка второго начала термодинамики. На практике доказана эффективная электрогенерация из низкотемпературных источников — вода, воздух, грунт, солнечное излучение.

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

UDC 620.97. The number of scientific speciality: 05.14.08.

Low-temperature electric power generation

S. G. Bayakin, PhD, an academician of the International Academy of Ecology and Life Safety (MANEB), project manager, Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences" (Krasnoyarsk city)

This paper consider historical and modern ideas about the nature of energy transformation processes within the boundaries of matter and motion, analyzes the four principles of thermodynamics, and assesses current attempts to implement the virtual experiment "Maxwell's demon". Theoretical calculations are given, and experimental confirmation of theoretical justifications is shown on the created experimental instance of a device operating on a real object on the principle of "Maxwell's demon". Prospects for the development of low-temperature power generation are outlined. A new interpretation of the second principle of thermodynamics is theoretically justified and proposed. In practice, effective power generation from low — temperature sources—water, air, soil, and solar radiation—has been proven.

Key words: the second law of thermodynamics, the "Maxwell's Demon", low-temperature electric power generation.



В 1840-х годах Юлиус фон Майер и Джеймс Джоуль количественно определили связь между механической работой и теплотой и сформулировали универсальный закон сохранения и превращения энергии, далее Рудольф Клаузиус и Уильям Томсон (барон Кельвин) систематизировали накопленные к тому времени знания и ввели понятия «энтропии» и «абсолютной температуры».

В 1906 году Вальтер Нернст опубликовал работу, в которой была сформулирована теорема, впоследствии получившая его имя и известная как «третье начало термодинамики».

Таким образом, на данном этапе коллективными усилиями человечества были сформулированы следующие четыре начала термодинамики:

1. «Нулевое» начало термодинамики: «изолированная термодинамическая система с течением времени самопроизвольно переходит в состояние термодинамического равновесия и остаётся в нём сколь угодно долго, если внешние условия сохраняются неизменными».

2. Первое начало термодинамики (закон сохранения и превращения энергии для термодинамической системы): «энергия любой замкнутой системы, при всех процессах, происходящих в системе, остаётся постоянной».

3. Второе начало термодинамики имеет несколько формулировок. Формулировка Томсона (Кельвина): «невозможен циклический процесс, единственным результатом которого является производство работы за счёт уменьшения внутренней энергии только одного теплового резервуара». Формулировка Вильгельма Оствальда: «невозможен вечный двигатель второго рода, вечный двигатель второго рода — это тепловая машина без низкотемпературного резервуара». Формулировка Клаузиуса: «теплота не может са-

мопроизвольно переходить от тела менее нагретого к более нагретому».

4. Третье начало термодинамики (тепловая теорема Нернста — физический принцип, определяющий поведение энтропии при приближении температуры к абсолютному нулю): «все процессы при абсолютном нуле, при котором система переходит из одного равновесного состояния в другое, происходят без изменения энтропии».

Первое начало термодинамики (закон сохранения и превращения энергии для термодинамической системы) звучит следующим образом: «энергия любой замкнутой системы, при всех процессах, происходящих в системе, остаётся постоянной»

Анализ

Анализируя современные формулировки всех имеющихся законов термодинамики, напрашивается резонный логический вопрос: не является ли формулировка «нулевого» начала термодинамики обратной формулировкой Клаузиуса из второго начала? Логика говорит, что да. То есть, если теплота не может самопроизвольно переходить от тела менее нагретого к более нагретому, то этот процесс может самопроизвольно происходить обратным образом, пока система не достигнет равновесия, что и сформулировано в «нулевом» начале. В этой связи совершенно резонно предположить, что нулевое начало термодинамики следует рассматривать как следствие формулировки Клаузиуса из второго начала термодинамики. Тем более что «нулевое» начало потому и «нулевое», что вошло в обиход физиков уже после существования первого и второго начал.

Относительно первого начала термодинамики на современном этапе науки дискутировать не имеет смысла — закон сохранения и трансформации энергии пока ещё никто не оспаривает. Этот закон необходимо принимать как аксиому, не требующую доказательств, — как закон сохранения материи, как точку отсчёта в термодинамике, аналогично точке в геометрии Эвклида.

Относительно третьего начала (тепловой теоремы Нернста) также нет оснований для обсуждения. Физический смысл и математическая логика теоремы очевидна, понятна, многократно экспериментально подтверждена и открывает массу возможностей для дальнейшего исследования предельных и запредельных состояний материи, энергии и объектов физического мира.

Самым спорным и проблемным выглядит второе начало термодинамики. А именно: если «теплота не может самопроизвольно переходить от тела менее нагретого к более нагретому», то и «циклический процесс, единственным результатом которого является производство работы за счёт уменьшения внутренней энергии только одного теплового резервуара» также будет невозможен.

Таким образом, самой логически понятной, физически справедливой и достоверно проверенной для второго начала термодинамики остаётся формулировка великого Клаузиуса.

В декабре 1867 года Джеймс Максвелл в письме к Питеру Тейту высказал идею устройства, нарушающего второй закон термодинамики. Через четыре года он представил её в монографии «Теория тепла». В 1874-м Томсон (Кельвин) весьма удачно назвал «демоном Максвелла» воображаемое существо, являющееся главным персонажем этого эксперимента.

Мысленный эксперимент Максвелла состоит в следующем: сосуд с газом разделён непроницаемой перегородкой на две части — правую и левую. В перегородке есть отверстие, около которого и находится микроскопический «демон Максвелла», позволяющий пролетать быстрым (горячим) молекулам газа только из левой части сосуда в правую, а медленным (холодным) молекулам — только из правой части сосуда в левую. Тогда через некоторый (достаточно большой) промежуток времени горячие (быстрые) молекулы окажутся в правом сосуде, а холодные (медленные) останутся в левом.

Таким образом, «демон Максвелла» позволит нагреть правую часть сосуда и охладить левую без дополнительного подвода энергии к системе.



При более детальном изучении эксперимента становится очевидным, что если рассмотреть замкнутую систему, включающую в себя «демона Максвелла» и сосуд, то для функционирования самого «демона» ему необходима передача энергии от внешнего источника. Тогда за счёт этой внешней энергии и производится разделение горячих и холодных молекул в сосуде, то есть переход в состояние с меньшей энтропией, но в этом случае система не будет замкнутой.

Тем не менее, этот парадокс со своим экстравагантным названием до сих пор привлекает внимание многих весьма известных учёных и изобретателей.

Так, в 1929 году приват-доцент Берлинского университета Лео Сциллард исключительно математически попытался связать информацию и энергию, но об экспериментальном физическом подтверждении математической формулы Сцилларда сведений пока нет [1]. Далее по его пути, но уже с позиций физики, пошёл советский математик Марк Рейзен, который считал, что атомы или молекулы газа могут находиться в двух долгоживущих метастабильных квантовых состояниях, и что существует множество веществ, отвечающих этому требованию.

Главный вывод из всех этих экспериментов: нахождение замкнутой термодинамической системы в двух долгоживущих метастабильных квантовых состояниях уже предполагает пересмотр нулевого и второго начал термодинамики и возможность реализации «демона Максвелла» в атомарно-квантовой области.

Теоретические и экспериментальные работы в этом направлении продолжают многими научными сообществами. Наиболее интересны два примера:

1. По сообщению портала New Scientist, в 2010 году мысленный эксперимент с «демоном Максвелла» якобы удалось



⚡ **Демон Максвелла** — главный персонаж мысленного эксперимента британского физика Джеймса Максвелла. Это воображаемое разумное микроскопическое существо, деятельность которого [демон «открывает» и «закрывает» перегородку, позволяя пролетать горячим молекулам газа только из левой части сосуда в правую, а холодным молекулам только из правой части в левую] позволяет нагреть правую часть сосуда и охладить левую без дополнительного подвода энергии к системе

воплотить в реальность физикам из университетов Тюо (Chuo University) и Токио (University of Tokyo). Японцы создали два связанных шарика полистирола диаметром 0,3 мкм каждый. Один находился на поверхности стекла, второй мог вращаться вокруг первого.

Новый эксперимент, описанный в статье, опубликованной в Nature Physics, позволил также проверить гипотетическое «уравнение Ярзинского» (Jarzynski equality), описывающее преобразование информации в энергию.

2. Далее в 2015 году физики из Финляндии, США и России (И. Хаймович из Института физики микроструктур РАН) создали автономного искусственного «демона Максвелла» [2]. Практически все попытки реализовать данного «демона» техническим образом находятся в области микромира и квантовой физики, в тоже время как Максвелл рассматривал работу своего «демона» в области классической физики — корпускулярной энергомеханики. Для технической реализации «демо-

на» в этой области следует обратить внимание на два выдающихся изобретения, которые давно применяются человеком по отдельности, но ещё не проявили себя совместным синергетическим эффектом.

Первое — это двигатель Стирлинга. Как это часто случается в науке и технике, выдающиеся достижения совершают не профессиональные учёные, а просто очень любознательные разумные люди. Таким и оказался шотландский священник Роберт Стирлинг, который в 1816 году получил английский патент №40811819 на двигатель, работающий практически на любой разнице температур. Теории цикла Стирлинга не существовало до тех пор, пока не появились работы Николя «Сади» Карно. В 1825 году Карно опубликовал свою работу «О движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу», в которой описал «цикл Карно», из которого следовало, что и цикл Стирлинга строился аналогичным образом.

Второе — тепловой насос. Концепция тепловых насосов была разработана ещё в 1852 году Томсоном (Кельвином) и в дальнейшем усовершенствована и детализирована Петером фон Риттингером, который спроектировал и установил первый известный тепловой насос в 1855-м. Тепловой насос — устройство для переноса тепловой энергии от низкотемпературного источника к высокотемпературному потребителю. В отличие от самопроизвольной передачи тепла, которая всегда происходит от горячего тела к холодному, тепловой насос переносит тепло в обратном направлении. Но для работы теплового насоса ему нужен внешний источник энергии. В процессе работы компрессор потребляет механическую или электрическую энергию. Соотношение перекачиваемой тепловой энергии и потребляемой электрической (или механической, с учётом КПД электродвигателя) называется «коэффициентом преобразования» (Coefficient of Performance, COP) и служит показателем эффективности теплового насоса. На практике COP тепловых насосов находится в пределах 2–7, а минимальное экономическое эффективное его значение — не менее 4,0.

Конструкция типового теплового насоса состоит из испарителя, конденсатора, компрессора и дросселя.

Широко применяемыми в нашей повседневной жизни примерами тепловых насосов являются холодильники и кондиционеры. В то же время современные тепловые насосы могут использоваться как для нагревания, так и для охлаждения, создавая требуемый климат независимо от внешней среды.

Теоретические выводы

1. На уровне молекулярных, атомарных и субатомных частиц (корпускул) существуют устойчивые термодинамические системы с метастабильным состоянием.
2. Уравнение Ярзинского показывает возможность метастабильного состояния в термодинамических системах:

$$\Delta F = F_a - F_b \text{ при } \Delta F = A,$$

где ΔF — разность энергий двух частей термодинамической системы; A — работа, совершаемая этой разницей энергий.

Таким образом, закрытая корпускулярная термодинамическая система, состоящая из двух разделённых частей, обладает разницей энергий (как минимум на энергию хотя бы одной корпускулы).



Это объяснимо в рамках классической физики и теории вероятности, а именно: «вероятность разделения движущихся корпускул одновременно на две равные части, как по количеству корпускул, так и по количеству суммарной энергии движущихся корпускул, стремится к нулю при увеличении числа разделяемых корпускул». Из чего следует вывод, что даже часть работы A хотя бы одной корпускулы возможно применить в качестве работы «демона Максвелла».

Главные выводы следующие:

1. Закрытая корпускулярная термодинамическая система, в которой тепловая энергия представлена в виде суммы кинетических энергий корпускул:

$$Q = \sum_{i=1}^n (0,5 m_i v_i^2),$$

состоящая из двух разделённых частей, обладает минимальной разницей энергий и возможностью её увеличения за счёт этой разницы.

2. Количественной связи между информацией и энергией на данное время не установлено.

Теорема

С целью подтверждения изложенных теоретических выводов предлагается доказательство следующей энергетической гипотезы: «в изолированной термодинамической системе, состоящей из двух разделённых частей, энергия от низкотемпературной части может передаваться к высокотемпературной части за счёт внутренней энергии низкотемпературной части системы».

С целью доказательства данной гипотезы создаётся техническая модель «демона Максвелла», в которой испаритель теплового насоса размещается в низкотемпературной части (НЧ) системы, а конденсатор и компрессор размеща-

при этом энергия $0,75 \Delta Q$ перемещается рабочим телом двигателя Стирлинга в низкотемпературную часть системы.

Тепловой насос, путём трансформации механической работы двигателя Стирлинга $A_{дс}$ в тепловую энергию $Q_{тн}$ с коэффициентом $COP = (4 \pm \Delta_{COP})$, перемещает тепловую энергию $Q_{тн}$ из низкотемпературной части системы в высокотемпературную и восстанавливает энергетический баланс системы. При этом тепловая энергия потерь механических систем двигателя Стирлинга и компрессора остаётся в высокотемпературной части системы и является составляющей частью $Q_{вч}$. В итоге энергетический баланс системы:

$$Q_{тн} = A_{дс} COP = 0,25 \Delta Q (4 \pm \Delta_{COP}) = \Delta Q (\pm \Delta_{COP}).$$

Выражаясь «демонической» терминологией, «демону Максвелла» достаточно четверти изначальной разницы энергии ΔQ в высокотемпературной части системы для своей работы, чтобы восстановить эту разницу в полном объёме из низкотемпературной части системы. Причём при нехватке «демонических сил» ($-\Delta_{COP}$) восстановить ΔQ не получится, а при избытке ($+\Delta_{COP}$) ΔQ будет восстановлена с избытком. Выражаясь языком формул, при $+\Delta_{COP}$ имеет место $Q_{вч} \uparrow \max$, $Q_{нч} \downarrow \min$, и система займёт крайнее метастабильное состояние с максимальной разницей энергий $\Delta Q \uparrow$, а при $-\Delta_{COP}$ имеем $Q_{вч} \downarrow \min$, $Q_{нч} \uparrow \max$, и система займёт другое крайнее метастабильное состояние с минимальной разницей энергий $\Delta Q \downarrow$.

Схема конструкции и движения энергии показаны на рис. 1. Конструкция работает следующим образом:

охлаждаемая часть двигателя Стирлинга размещается в НЧ, а нагреваемая часть — в ВЧ, при этом вал двигателя Стирлинга соединяется с валом компрессора, который также располагается в ВЧ, что предусматривает возможность суммировать и учитывать тепловые потери, обусловленные трением в механической части конструкции, в энергии, перемещаемой тепловым насосом $Q_{тн}$.

Исходные данные модели:

1. Изолированная корпускулярная термодинамическая система, состоящая из двух частей, разделённых изолирующей стенкой, где энергия низкотемпературной части $Q_{нч}$ меньше энергии высокотемпературной $Q_{вч}$ на разницу $\Delta Q = Q_{вч} - Q_{нч}$.
2. Тепловой насос, перемещающий энергию $Q_{тн}$ с коэффициентом преобразования $COP = (4 \pm \Delta_{COP})$.
3. Двигатель Стирлинга с КПД = 25 %.

Двигатель Стирлинга преобразует изначальную разницу тепловых энергий частей системы ΔQ в механическую работу $A_{дс}$ с КПД = 25 %, то есть $A_{дс} = 0,25 \Delta Q$,

1. Изначально термодинамическая система находится в неравновесном состоянии с разницей энергий, достаточной для работы двигателя Стирлинга с превращением тепловой энергии в механическую с КПД = 25 %. При этом 75 % тепловой энергии перемещается рабочим телом двигателя в низкотемпературную часть термодинамической системы.

2. Двигатель Стирлинга вращает вал компрессора теплового насоса.

3. Тепловой насос посредством механической энергии перемещает рабочим телом теплового насоса энергию из низкотемпературной части в высокотемпературную часть термодинамической системы с коэффициентом $COP = (4 \pm \Delta_{COP})$.

Вывод: «в изолированной термодинамической системе, состоящей из двух разделённых частей, энергия от низкотемпературной части системы может передаваться к высокотемпературной части системы за счёт внутренней энергии низкотемпературной части системы».

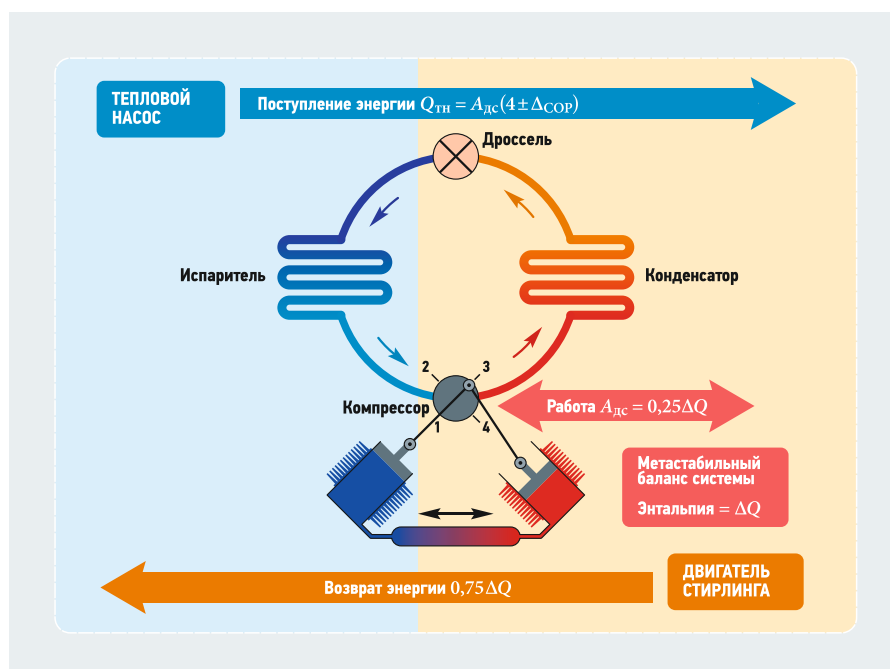


Рис. 1. Схема конструкции и движения энергии

Следствием этого является то, что на современном этапе развития науки и техники три начала термодинамики предлагается сформулировать так:

1. Первое начало (закон сохранения и превращения энергии для термодинамической системы): «энергия любой замкнутой системы, при всех процессах, происходящих в ней, остаётся постоянной».

2. Второе начало термодинамики в предлагаемой формулировке: «в изолированной термодинамической системе, состоящей из двух разделённых частей, энергия от низкотемпературной части системы может передаваться к высокотемпературной части системы за счёт внутренней энергии низкотемпературной части системы».

3. Третье начало термодинамики (тепловая теорема Нернста): «все процессы при абсолютном нуле, при которых система переходит из одного равновесного состояния в другое, происходят без изменения энтропии».

В рамках данных выводов и экспериментального подтверждения получен патент РФ №2692615, поданы международ-

Соотношение перекачиваемой тепловой энергии и потребляемой электрической (или механической с учётом КПД электродвигателя) называется «коэффициентом преобразования»

ные заявки ЕПО 2019000011, РСТ/RU 2018/000784, автором создано экспериментальное устройство — автономная климатическая система с генерацией электроэнергии из воздушной среды, работающая на действующем объекте (в медцентре, рис. 2). Устройство работает без внешнего подключения и полностью обеспечивает климатический режим медицинского центра. Электроэнергия генерируется турбоэлектрогенератором Стирлинга собственной конструкции за счёт разницы температур внешней среды и помещения, как при отопительном режиме, так и в режиме кондиционирования.

Выводы

В теоретическом аспекте обоснована новая трактовка второго начала термодинамики. На практике доказана эффективная электрогенерация из низкотемпературных источников — вода, воздух, грунт, солнечное излучение. Область дальнейшего развития и применения технологии термотрансформации крайне широка — от бытовых автономных холодильников, кондиционеров и тепловых насосов до энергообеспечения крупных объектов, комплексов, транспорта, поселений и городов без зависимости от угля, нефти и газа. В итоге есть реальная перспектива развития жизненного пространства в формате безуглеродной энергетики. ●

1. Храмов Ю.А. Силард Лео / Физики: Биографический справочник. — М.: Наука, 1983. С. 256.
2. Встроенный демон Максвелла как информационный холодильник. В сб.: Физика / Я.В. Коски, А. Кутвонен, И.М. Хаймович и др. Преподобный Летт. 115, 260602. Оpubл. 30.12.2015.

References — see page 60.

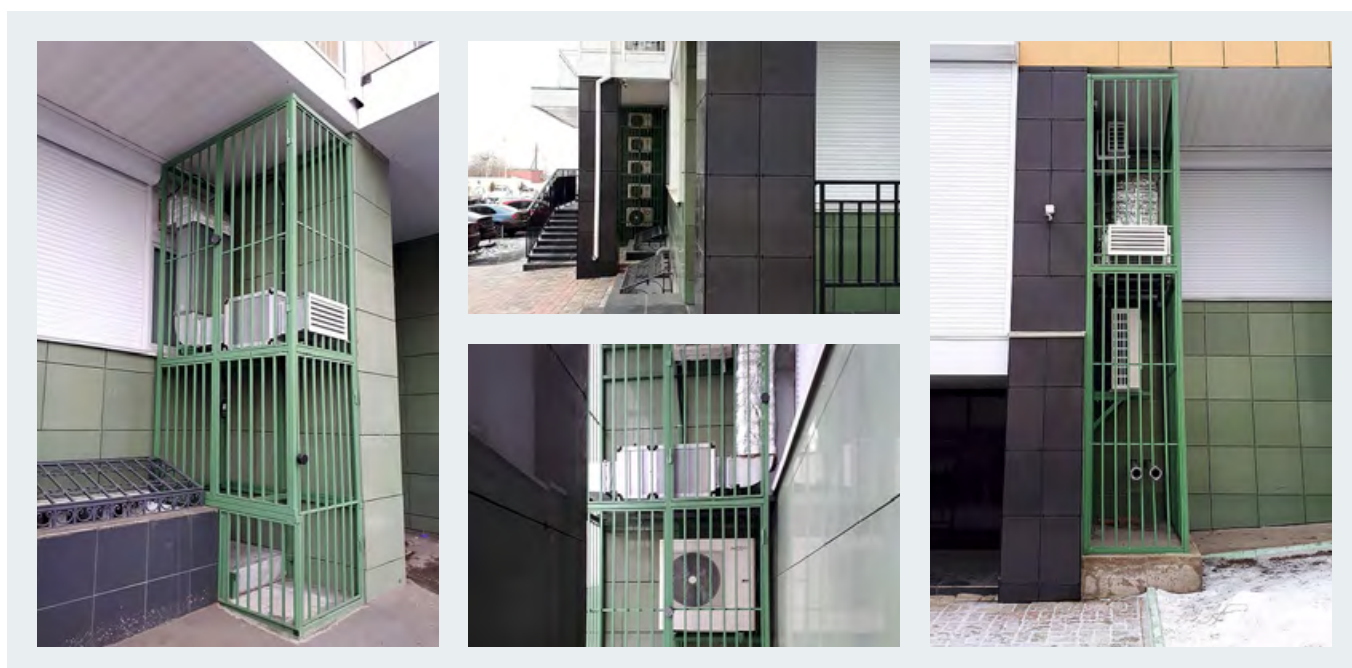


Рис. 2. Экспериментальное устройство — автономная климатическая система с генерацией электрической энергии из воздушной среды

Low-temperature electric power generation. Pp. 55–59.

Sergey G. Bayakin, PhD, an academician of the International Academy of Ecology and Life Safety (MANEB), project manager, Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences" (Krasnoyarsk city)

-
1. Ju.A. Hramov. *Silard Leo* [Szilárd Leó]. *Fiziki: Biograficheskiy spravochnik* [Physics: A Biographical Reference]. Moscow. *Nauka* ["The Science" Publishers]. 1983. P. 256.
 2. Ja.V. Koski, A. Kutvonen, I.M. Hajmovich et al. *Vstroennyj demon Maksvella kak informacionnyj holodil'nik. V sb.: Fizika* [Built-in Maxwell's Demon as an information refrigerator. In the coll.: Physics]. *Prepodobnyj Lett.* [The Reverend Lett.] 115, 260602. Publ.: December 30, 2015.