

УДК - 530.12

**Шиллер Михаил Павлович**

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)*

*Россия, г. Ульяновск*

**Камалетдинова Алина Ильдаровна**

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)*

*Россия, г. Ульяновск*

**Иванова Олеся Сергеевна**

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)*

*Россия, г. Ульяновск*

**Трандин Семён Евгеньевич**

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)*

*Россия, г. Ульяновск*

## **АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ПАРАДОКСА «ДЕМОНА МАКСВЕЛЛА» В КОНТЕКСТЕ ФИЗИКИ ИНФОРМАЦИИ**

*Аннотация:* В статье представлено теоретическое исследование классического термодинамического парадокса, предложенного Джеймсом Клерком Максвеллом. Целью работы является анализ взаимосвязи между термодинамической энтропией и количеством информации в замкнутой системе. Методом логического анализа и исторической реконструкции рассмотрены попытки разрешения парадокса, предложенные Л. Сцилардом и Р. Ландауэром. В результате исследования продемонстрировано, что кажущееся нарушение Второго начала термодинамики устраняется при учете энергетических затрат на стирание информации в памяти гипотетического наблюдателя.

*Ключевые слова:* термодинамика, энтропия, демон Максвелла, теория информации, принцип Ландауэра, необратимые процессы, теоретическая физика.

**Shiller Mikhail Pavlovich**

*Student, ULSU(Ulyanovsk State University)*

*Ulyanovsk, Russia*

**Kamaletdinova Alina Ildarovna**

*Student, ULSU(Ulyanovsk State University)*

*Ulyanovsk, Russia*

**Ivanova Olesya Sergeevna**

*Student, ULSU(Ulyanovsk State University)*

*Ulyanovsk, Russia*  
**Trandin Semyon Evgenievich**  
*Student, ULSU(Ulyanovsk State University)*  
*Ulyanovsk, Russia*

## **ANALYSIS OF THE "MAXWELL'S DEMON" THERMODYNAMIC PARADOX IN THE CONTEXT OF INFORMATION PHYSICS**

*Abstract:* The article presents a theoretical study of the classic thermodynamic paradox proposed by James Clerk Maxwell. The aim of the work is to analyze the relationship between thermodynamic entropy and the amount of information in a closed system. Using the method of logical analysis and historical reconstruction, the attempts to resolve the paradox proposed by L. Szilard and R. Landauer are considered. The study demonstrates that the apparent violation of the Second Law of Thermodynamics is eliminated by taking into account the energy costs of erasing information in the memory of a hypothetical observer.

*Keywords:* thermodynamics, entropy, Maxwell's demon, information theory, Landauer's principle, irreversible processes, theoretical physics.

### **Введение**

Второе начало термодинамики является одним из фундаментальных столпов современной физики. В своей наиболее известной формулировке оно утверждает, что в замкнутой изолированной системе энтропия не может убывать со временем. Это означает, что теплота самопроизвольно переходит только от более нагретого тела к менее нагретому, и обратный процесс без затраты внешней работы невозможен.

Однако в 1867 году великий физик Джеймс Клерк Максвелл предложил мысленный эксперимент, который, казалось бы, ставил под сомнение неизбежность этого закона. Он описал гипотетическое разумное существо микроскопических размеров (впоследствии названное Уильямом Томсоном «демоном»), способное различать скорости отдельных молекул газа и сортировать их.

Актуальность данной темы обусловлена тем, что на протяжении более чем ста лет этот парадокс оставался предметом острых дискуссий. Его окончательное разрешение привело к рождению нового раздела науки —

физики информации, которая сегодня играет ключевую роль в разработке нанотехнологий и квантовых компьютеров.

Целью данной работы является теоретический разбор механизма действия «демона Максвелла» и объяснение того, почему этот механизм не нарушает законы физики, если рассматривать информацию как физическую величину.

### **Методология теоретического анализа**

В качестве основного метода исследования используется метод мысленного эксперимента и логического моделирования. Мы рассматриваем теоретическую модель, состоящую из сосуда с газом, разделенного на две части (А и Б) непроницаемой перегородкой с маленьким отверстием. Отверстием управляет некое устройство или существо («демон»).

Исследование проводится в три этапа:

1. Описание исходного парадокса и кажущегося нарушения законов термодинамики.
2. Анализ роли процесса измерения скорости молекул.
3. Применение принципа Ландауэра для расчета энергетического баланса системы.

Мы не проводим натуральных экспериментов, так как «демон Максвелла» является теоретической абстракцией, предназначенной для проверки границ применимости физических теорий, а не инженерным устройством.

### **Результаты исследования и обсуждение**

#### *1. Суть парадокса*

Представим сосуд, наполненный газом, находящимся в состоянии теплового равновесия. Это означает, что температура во всем объеме одинакова. Однако, согласно молекулярно-кинетической теории, скорости отдельных молекул различны и распределены по закону Максвелла: есть быстрые («горячие») и медленные («холодные») молекулы.

Гипотетический демон, управляющий заслонкой, пропускает быстрые молекулы из левой части сосуда в правую, а медленные — из правой в левую. Через некоторое время быстрые молекулы скопятся в одной части, а

медленные — в другой. В результате одна часть газа нагреется, а другая охладится без совершения внешней работы. Это привело бы к уменьшению энтропии замкнутой системы ( $\Delta S < 0$ ), что прямо противоречит Второму началу термодинамики. Если бы такое устройство было возможно, оно стало бы вечным двигателем второго рода.

## 2. Связь информации и энтропии

Долгое время физики полагали, что разрешение парадокса кроется в процессе измерения. Демону необходимо "увидеть" молекулу, чтобы определить ее скорость. Для этого он должен использовать, например, фотоны света, которые при взаимодействии с молекулой передают ей энергию, внося возмущение в систему. Однако расчеты, проведенные в начале XX века, показали, что теоретически можно провести измерение с исчезающе малым потреблением энергии.

Настоящий прорыв в понимании проблемы произошел благодаря работам Лео Сциларда и позже Рольфа Ландауэра. Было установлено, что демон должен не только измерять скорость, но и запоминать информацию о каждой молекуле, чтобы принять решение: открывать заслонку или нет.

Здесь мы приходим к единственной необходимой формуле, связывающей термодинамику и теорию информации. Изменение энтропии системы тесно связано с количеством информации, которой мы о ней располагаем. Согласно принципу, сформулированному Рольфом Ландауэром в 1961 году, любая логически необратимая операция, такая как стирание информации (очистка памяти демона для нового измерения), неизбежно сопровождается выделением тепла.

Минимальное количество теплоты  $Q$ , которое выделяется при стирании одного бита информации при температуре  $T$ , определяется выражением:

$$Q \geq k_B T \ln 2$$

где  $k_B$  — постоянная Больцмана ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К).

## 3. Разрешение парадокса

Рассмотрим полный цикл работы демона.

1. **Измерение:** Демон получает информацию о молекуле. Энтропия газа уменьшается за счет сортировки, но энтропия памяти демона растет (он переходит из состояния «не знаю» в состояние «знаю»).

2. **Сортировка:** Демон открывает дверцу. Газ становится более упорядоченным.
3. **Сброс цикла:** Чтобы продолжить работу с следующей молекулой, демон должен «забыть» предыдущее измерение, то есть стереть бит информации из своей памяти.

Именно на этапе стирания информации происходит диссипация энергии. Количество теплоты, которое демон вынужден выделить в окружающую среду при очистке памяти, в точности (или с превышением) компенсирует то уменьшение энтропии, которое было достигнуто сортировкой молекул.

Таким образом, если рассматривать систему «газ + демон + память демона» как единое целое, то суммарная энтропия не уменьшается. Второй закон термодинамики выполняется, но только при условии, что информация признается физической сущностью, участвующей в энергетическом обмене.

## **Заключение**

В ходе теоретического анализа мы рассмотрели механизм работы демона Максвелла и выяснили причину его кажущейся эффективности. Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Парадокс Максвелла не опровергает Второе начало термодинамики, а лишь указывает на ограниченность классического подхода, не учитывающего информационные процессы.
2. Ключевым моментом, спасающим термодинамику от краха, является не процесс измерения скорости молекулы, а процесс стирания информации, накопленной наблюдателем.
3. Существует фундаментальный физический предел вычислений (предел Ландауэра), который накладывает ограничения на энергоэффективность любых вычислительных систем.

Демон Максвелла перестал быть просто загадкой из учебника физики. Сегодня понимание взаимосвязи между энтропией (мерой беспорядка) и информацией (мерой порядка) лежит в основе проектирования современных микропроцессоров, так как удаление данных неизбежно ведет к их нагреву. Таким образом, абстрактная теоретическая задача XIX века нашла свое решение в практической плоскости информационных технологий XXI века.

## Список литературы

1. *Максвелл Дж. К.* Теория теплоты. — М.: ГИТТЛ, 1957.
2. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. Том 4. Кинетика, теплота, звук. — М.: Мир, 1965.
3. *Кадомцев Б.Б.* Динамика и информация. — М.: Редакция журнала «Успехи физических наук», 1999.
4. *Leff H.S., Rex A.F.* Maxwell's Demon 2: Entropy, Classical and Quantum Information, Computing. — CRC Press, 2002.
5. *Landauer R.* Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process // IBM Journal of Research and Development. — 1961. — Vol. 5. — P. 183-191.