

## МАГНИТОГИДРОДИНАМИКА И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Писарева Е.А.<sup>1</sup>, студентка гр.418301

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь

Чаевский В.В. – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики

**Аннотация.** В статье рассматриваются основные принципы магнитогидродинамики (МГД) и её применение в энергетике. Описаны исторические аспекты развития МГД, ключевые уравнения, а также практическое использование в МГД-генераторах, термоядерных реакторах и системах охлаждения с жидкометаллическими теплоносителями. Особое внимание уделено перспективам развития МГД-технологий для повышения эффективности энергетических систем.

**Ключевые слова.** Магнитогидродинамика, МГД, электропроводящая жидкость, МГД-генератор, термоядерный реактор, магнитное поле, жидкометаллический теплоноситель, энергетика, сила Лоренца, уравнения МГД.

Магнитогидродинамика (МГД) — это раздел физики, изучающий движение электропроводящих жидкостей и плазмы в магнитных полях. Данное направление получило широкое применение в энергетике, включая разработку МГД-генераторов, термоядерных реакторов и систем охлаждения с жидкометаллическими теплоносителями [1].

Основы МГД были заложены в начале XX века в работах Джозефа Лармора, а затем развиты Ханнесом Альвенем, который в 1942 году предложил концепцию магнитогидродинамических волн (альвеновских волн) [2].

МГД объединяет уравнения гидродинамики и уравнения электромагнетизма Максвелла. Основные уравнения МГД включают:

Уравнение Навье-Стокса с учетом электромагнитных сил:

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + (v * \nabla) v \right) = -\nabla P + \eta_m \nabla^2 v + J * B \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность жидкости,  $v$  — скорость потока,  $P$  — давление,  $\eta_m$  — вязкость,  $J$  — плотность тока,  $B$  — магнитное поле [3].

Уравнение индукции (закон Фарадея для проводящей жидкости) (2):

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla * (v * B) + \eta_m \nabla^2 B \quad (2)$$

где  $\eta_m$  — магнитная диффузивность.

Закон Ома в движущейся среде (3):

$$J = \sigma(E + v * B) \quad (3)$$

где  $\sigma$  — удельная электропроводность,  $E$  — электрическое поле.

Эти уравнения описывают динамику проводящей жидкости в магнитном поле и являются фундаментом для применения МГД в энергетике.

В идеальном приближении считается, что электропроводность среды бесконечна, а диффузия магнитного поля отсутствует. Это приводит к тому, что силовые линии магнитного поля “заморожены” в движущуюся среду, следуя за ней в процессе эволюции.

Движение плазмы в рамках идеальной магнитной гидродинамики описывается системой уравнений, включающей закон сохранения массы (4), уравнение движения (5) и энергетическое уравнение (6).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla * \rho v = 0 \quad (4)$$

где  $\rho$  — плотность плазмы, а  $v$  — её скорость. Это уравнение отражает тот факт, что масса сохраняется при движении, а плотность изменяется только за счёт потока вещества.

Динамика плазмы определяется уравнением движения (5), аналогичным уравнению Эйлера для идеальной жидкости, но с дополнительным членом, описывающим влияние магнитного поля:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\nabla p + JB \quad (5)$$

где  $p$  — давление плазмы,  $B$  — магнитное поле,  $J = \frac{1}{\mu_0} \nabla * B$  — плотность электрического тока, а  $J*B$  представляет собой силу Лоренца. Эта сила оказывает влияние на движение заряженных частиц,

вызывая их движение вдоль силовых линий магнитного поля или формируя устойчивые магнитные структуры, такие как солнечные вспышки и магнитосферные возмущения.

Баланс энергии в системе определяется энергетическим уравнением (6), которое включает вклад кинетической, внутренней и магнитной энергии:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla * \left[ \left( E + p + \frac{B^2}{2\mu_0} \right) v - \frac{B(v*B)}{\mu_0} \right] = 0 \quad (6)$$

Одним из наиболее перспективных направлений МГД стало создание магнитогидродинамических генераторов (МГД-генераторов) — устройств, позволяющих напрямую преобразовывать тепловую энергию плазмы в электрическую. Схема МГД-генератора показана на рисунке 1.

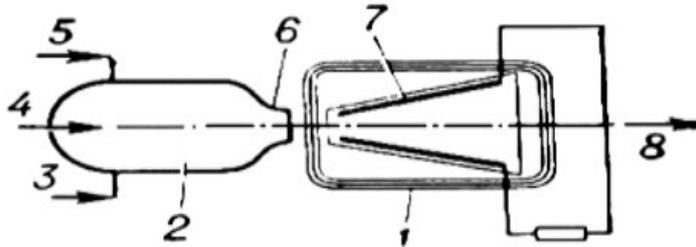


Рисунок 1 — Схема МГД-генератора: 1 — обмотка электромагнита; 2 — камера сгорания; 3 — присадка; 4 — воздух; 5 — топливо; 6 — сопло; 7 — электроды с последовательно включенной нагрузкой; 8 — выход продуктов сгорания

Рабочим телом в таких установках является высокотемпературная плазма, движущаяся в магнитном поле. Согласно формуле (7), основанной на законе Фарадея и законе Ома для движущихся сред:

$$E = vBL \quad (7)$$

где  $v$  — скорость потока,  $B$  — магнитная индукция,  $L$  — длина проводящего канала [4].

При движении проводящей жидкости в магнитном поле возникает электродвижущая сила, которая преобразуется в электрическую энергию, обеспечивая высокую эффективность работы системы.

В отличие от традиционных турбогенераторов, где используется механическое вращение, МГД-генераторы работают на принципе прямого преобразования энергии потока ионизированного газа в электричество. Это позволяет значительно повысить эффективность энергетических установок и снизить механические потери. Принцип работы МГД генераторов показан на рисунке 2:

1. Нагрев рабочего тела – газ (например, аргон с добавлением калия) нагревается до высоких температур (~3000 К), что приводит к его ионизации.
2. Движение плазмы через магнитное поле – поток газа проходит через канал генератора, пересекая магнитное поле.
3. Индукция электрического тока – в плазме индуцируется электродвижущая сила.
4. Сбор электроэнергии – электроды, установленные вдоль потока, собирают электрический ток.
5. Охлаждение и рециркуляция газа – отработанный газ охлаждается и может повторно использоваться [3].

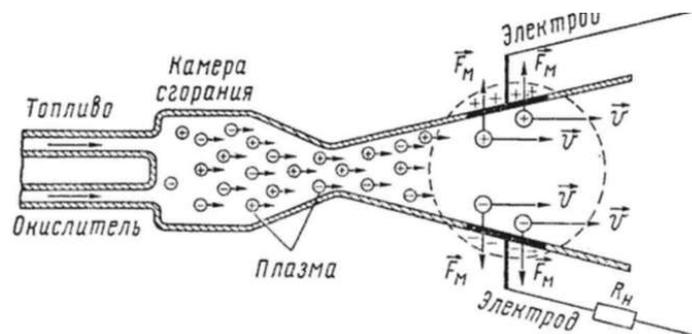


Рисунок 2 – Принцип работы МГД-генератора.

В термоядерных реакторах, таких как токамаки и стеллараторы, МГД используется для стабилизации плазмы. Магнитные поля создают ограничивающую «ловушку», предотвращая контакт горячей плазмы со стенками реактора [5].

Основное уравнение, описывающее равновесие плазмы в магнитном поле, — уравнение Граду-Шафранова (8):

$$\Delta \psi = -\mu_0 R^2 \frac{\partial p}{\partial \psi} - \frac{1}{2} \frac{\partial F^2}{\partial \psi} \quad (8)$$

где  $\psi$  — магнитный поток,  $p$  — давление плазмы,  $F$  — тороидальный поток [5].

Жидкие металлы (натрий, литий, ртуть) используются в ядерной энергетике в качестве теплоносителей. Для их циркуляции применяются МГД-насосы, строение которых представлено на рисунке 3.

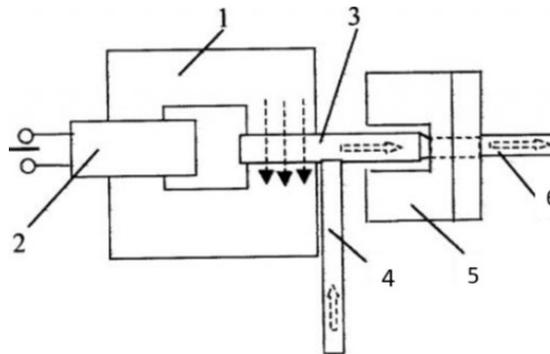


Рисунок 2 – Строение МГД-насоса: 1 — магнитопровод; 2 — обмотка; 3 — плоский канал; 4 — металлопровод; 5 — П-образный магнитопровод; 6 — выходной патрубок

Они обеспечивают надежность и эффективность транспортировки жидких металлов в экстремальных условиях, работающие по принципу силы Лоренца (9):

$$F = JB \quad (9)$$

это означает, что сила Лоренца действует перпендикулярно как вектору плотности тока, так и вектору магнитного поля.

Эти насосы бесконтактны и могут работать при экстремально высоких температурах, что делает их незаменимыми в перспективных реакторах [6].

Магнитогиродинамика играет важную роль в космических исследованиях и разработке инновационных технологий для освоения космоса. Например, МГД используется для проектирования двигателей нового поколения, таких как МГД-пропульсивные системы. Эти двигатели основаны на использовании ионизированного газа (плазмы) для создания тяги без движущихся частей, что позволяет существенно повысить надёжность и долговечность оборудования. Плазма движется под воздействием магнитных полей, а ЭДС, генерируемая за счёт взаимодействия магнитного поля и ионов, используется для управления траекторией космического аппарата. Такие системы особенно перспективны для длительных миссий в дальнем космосе.

Современные исследования направлены на повышение КПД МГД-генераторов за счёт оптимизации рабочих веществ (например, плазмы с добавками щелочных металлов; разработку сверхпроводящих магнитов для термоядерных реакторов; улучшение термостойкости материалов для МГД-устройств.

Магнитогиродинамика является важной областью современной физики, применяемой в энергетике для генерации электричества, управления термоядерными реакторами и создания бесконтактных насосов. Развитие этой науки открывает новые горизонты для энергетики будущего, делая её более эффективной и экологически чистой. Применение МГД позволяет использовать уникальные свойства электропроводящих жидкостей и плазмы для повышения производительности энергетических установок. Кроме того, изучение МГД-технологий способствует разработке новых методов теплового управления и охлаждения в экстремальных условиях.

**Список использованных источников:**

1. Алеманов, В. В. *Магнитная гидродинамика* / В. В. Алеманов. М.: Наука, 2010. 320 с.
2. Alfvén, H. *Existence of Electromagnetic-Hydrodynamic Waves* / H. Alfvén // *Nature*. 1942. Vol. 150. P. 405.
3. Физическая энциклопедия: *Магнитогиродинамика* [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://femto.com.ua/articles/part\\_1/2098.html](https://femto.com.ua/articles/part_1/2098.html). Дата доступа: 20.03.2025.
4. Freidberg, J. P. *Plasma Physics and Fusion Energy* / J. P. Freidberg. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 698 p.
5. Wesson, J. *Tokamaks* / J. Wesson. Oxford: Oxford University Press, 2004. 808 p.
6. Moreau, R. *Magneto hydrodynamics* / R. Moreau. Springer, 2018. 301 p.

## MAGNETOHYDRODYNAMICS AND ITS APPLICATION IN ENERGY

*Pisareva E.A.<sup>1</sup>*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus<sup>1</sup>*

*Chayouski V.V. – PhD, associate professor of the Department of Physics*

**Annotation.** The article discusses the basic principles of magnetohydrodynamics (MHD) and its application in the field of energy. Historical aspects of the development of MHD, key equations, and practical applications in MHD generators, thermonuclear reactors, and cooling systems with liquid-metal coolants are described. Special attention is given to the prospects of MHD technology development for improving the efficiency of energy systems.

**Keywords.** Magnetohydrodynamics, MHD, conductive liquid, MHD generator, thermonuclear reactor, magnetic field, liquid-metal coolant, energy, Lorentz force, MHD equations.