

## К ВОПРОСУ О МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ ЭНЕРГИИ

Д. А. ШАХМЕТОВ<sup>1</sup>, А. Е. КИШАЛОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>troukles@yandex.ru, <sup>2</sup>kishalov@ufanet.ru.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Статья посвящена обзору метода магнитогидродинамического преобразования энергии, позволяющему увеличить КПД при выработке электрической энергии без повышения температуры перед подвижными механическими частями существующих паровых турбин ТЭЦ, что позволяет сохранить их ресурс. Описываются физические законы и магнитные свойства веществ, на основе которых был разработан МГД – генератор. Рассматривается принципиальная схема МГД – генератора с Фарадеевским линейным каналом, а также достоинства и недостатки данного метода преобразования энергии. Рассматривается отечественный опыт возведения электростанции с МГД-генератором «У–25» и делается обзор примеров международного сотрудничества в этой области. Проанализированы эффективность построенных и работающих установок и возможные перспективы развития магнитогидродинамического преобразования энергии в будущем.

**Ключевые слова:** энергетика; магнитогидродинамический генератор; закон Фарадея; ЭДС; У–25; Марк–V, генерация энергии, ТЭЦ.

### ВВЕДЕНИЕ

Потребности людей в тепловой и электрической энергии растут с каждым годом. По данным Международного энергетического агентства, в 2015 г. мировое энергопотребление составило 20,76 трлн кВт·ч, через 15 лет прогнозируется 33,4 трлн кВт·ч (прирост на 60%), а к 2050 г. потребление энергии может удвоиться – до 41,3 трлн кВт·ч. Наличие доступной для потребления энергии необходимо для удовлетворения растущих потребностей человека, увеличения продолжительности и улучшения условий его жизни. Для этого необходимо внедрять методы повышения эффективности нынешних источников производства энергии, а также искать новые или же малоизученные источники энергии.

Одним из таких способов является магнитогидродинамический метод производства электроэнергии. Идея магнитогидродинамического преобразования теплоты в электричество была придумана еще в XVIII веке. Используя эту идею магнитогидродинамический генератор (МГД–генератор) непосредственно преобразует тепловую энергию (кинетическую энергию заряженных частиц движущегося рабочего тела) в электрическую энергию и тем самым позволяет существенно повысить эффективность использования топливных ресурсов [1].

### ПРИНЦИП РАБОТЫ

Магнитогидродинамический генератор – это электроэнергетическое устройство, в котором под действием закономерностей магнитной динамики происходит преобразование тепловой и (или) кинетической энергии электропроводящей среды в электрическую энергию постоянного тока. В случае преобразования электрической энергии в тепловую или кинетическую энергию, устройство называется МГД–ускорителем. К настоящему времени наиболее полно исследованы МГД–генераторы и жидкометаллические МГД–насосы, и дроссели, техническая реализация которых доведена до опытно-промышленного производства.

Принцип действия МГД-генератора основан на законе электромагнитной индукции М.Фарадея. При движении электропроводящей среды с электропроводностью  $\sigma$  со скоростью  $U$  вдоль оси канала прямоугольного сечения в магнитном поле с индукцией  $B$ , в каждой ее точке возникает локальная ЭДС (индуцированное поле)  $U \times B$ . Между электродами – анодом с потенциалом  $\phi_a$  и катодом с  $\phi_k$  возникнет разность потенциалов

$$V_y = \phi_a - \phi_k,$$

а в плазме – электрическое поле

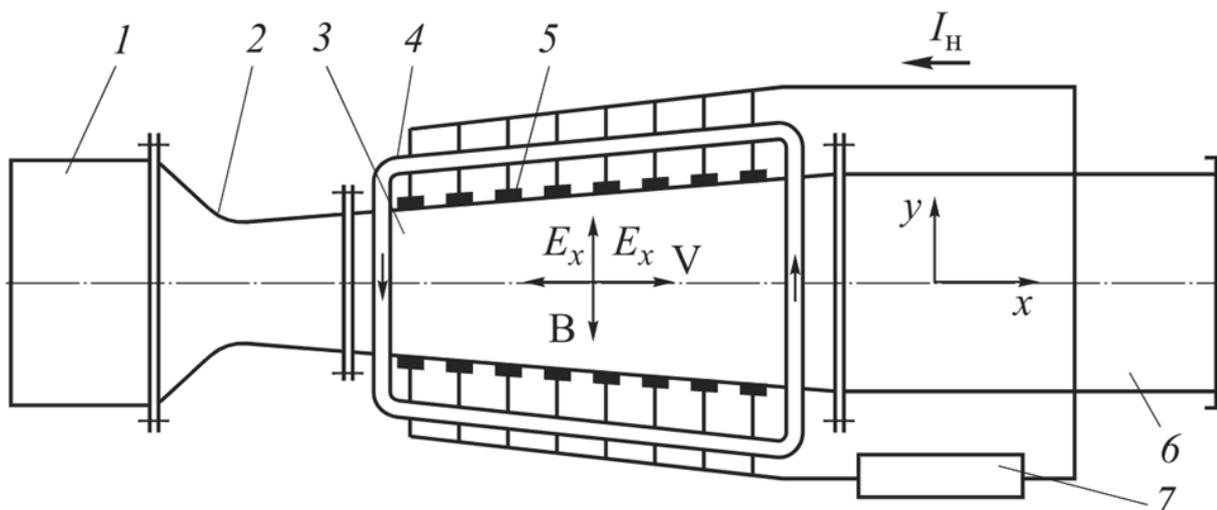
$$E \approx V_y / h,$$

направленное против индуцированного  $U \times B$ . Тогда эффективное (или же действующее) поле:

$$E^* = E + U \times B.$$

Рабочим телом в МГД-генераторе могут быть ионизированные газы (плазма), жидкие металлы, электролиты. Однако, для создания генераторов энергетического назначения наиболее подходящим рабочим телом оказалась плазма [2].

Принципиальная схема кондукционного МГД-генератора с Фарадеевским линейным каналом показана на рис. 1. В кондукционных МГД-генераторах генерируемый в плазме ток поступает на токосъемные электроды и далее в сеть. Канал МГД-генератора называется Фарадеевским потому, что ток на электроды течет по направлению индуцированной по закону Фарадея ЭДС (вдоль оси  $y$ ) [3].



**Рис. 1.** Схема кондукционного МГД-генератора:  
1 – источник рабочего тела; 2 – сопло; 3 – МГД-канал; 4 – электромагнит;  
5 – электроды; 6 – диффузор; 7 – нагрузка

При протекании тока в магнитном поле в плазме возникает электромагнитная или пондеромоторная сила (сила Ампера) плотностью

$$F = j \times B,$$

направленная против направления течения. Плазма в единицу времени совершает работу по преодолению пондеромоторной силы плотностью

$$A = [j \times B]v,$$

основная часть которой передается в виде полезной электрической мощности плотностью

$$N_{уд} = j \cdot E$$

во внешнюю нагрузку (в сеть), а другая часть – диссипирует в плазме [3].

Для получения КПД МГД–генератора на уровне 70...75% необходимо обеспечить минимальные потери на трение и тепловые потери через стенки в процессе преобразования энергии. Согласно приведенным выше формулам, ЭДС зависит от скорости движения в потоке, что в свою очередь приводит к выбору больших скоростей движения потока. Однако при сверхзвуковых скоростях движения потока происходит сильное тепловыделение. Из-за чего для МГД–генераторов с базовой нагрузкой при давлении на входе  $P_{мг} < 1$  МПа оптимальным является дозвуковой режим течения ( $M < 1$ ). При давлении на входе в МГД–генератор  $1 < P_{мг} < 2$  МПа выгодно принимать режим течения с переменным числом  $M$  по длине канала ( $M_1 = 1, 2 \dots 1, 4$  и  $M_2 = 1, 0 \dots 1, 1$ ).

Для пиковых генераторов при  $P_{мг} = 2 \dots 3$  МПа применяют сверхзвуковые режимы течения с  $M = 1, 8 \dots 2, 2$ . Для безотрывного течения в канале необходимо чтобы скорость на выходе из МГД–генератора составляла 0,8 от скорости на входе.

В качестве энергетического устройства МГД–генератор обладает очень интересными характеристиками, которые делают его пригодным для различных специальных применений. В МГД–генераторе функции как турбины, так и генератора электроэнергии объединены в единое целое с простой компактной геометрией. Нет вращающихся частей, которые вызывают вибрации и шум, а также ограничивают ресурс. Турбины высокой мощности, работающие при высоких температурах и скоростях, менее надежны, чем МГД системы из-за высоких значений напряжения. Выходная мощность постоянного тока и время запуска всего несколько миллисекунд делают эту схему производства электроэнергии очень привлекательной [4].

При исследовании перспектив развития энергетических установок представляет интерес объединение ГТУ и ПТУ с МГД–генератором. В комбинированных ГТУ с МГД–генератором возможно применение термодинамического цикла с высокой максимальной температурой и получение наибольшей экономичности по сравнению с другими тепловыми установками [1].

Основными преимуществами МГД–генераторов являются:

- высокая начальная температура цикла,
- простота конструкции,
- отсутствие подвижных частей,
- большая единичная мощность (до нескольких ГВт на одной установке),
- почти мгновенный запуск.

Недостатками МГД–генератора являются:

– в МГД–генераторах генерируется постоянный ток, что требует применения мощных и экономичных инверторов,

– отсутствие материалов способных работать при запредельных температурах длительное время,

– создание сверхсильных магнитных полей. Все имеющиеся сверхпроводники имеют критическую величину напряженности магнитного поля. Когда внешнее магнитное поле становится достаточно сильным, выше "критического" значения  $B$ , то состояние сверхпроводимости "разрушается". Например, у сверхпроводника  $Nb_3Sn$  критическая величина напряженности магнитного поля –  $B_c = 24, 5 \text{--} 28$  Тл. На сегодняшний день сверхпроводником с самой высокой температурой перехода при атмосферном давлении является купрат ртути, бария и кальция при температуре около 133 К. Существуют и другие сверхпроводники с более высокими зарегистрированными температурами перехода – например, супергидрид лантана ( $LaH_{10}$ ) при температуре 250 К, но они возникают только при очень высоких давлениях ( $P \approx 170$  ГПа).

### СТРОИТЕЛЬСТВО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ УСТАНОВОК В МИРЕ

В начале XX века было изобретено и запатентовано большое количество МГД устройств и машин. В 1907 году Нортрупом был разработан первый МГД–насос. МГД–насос – это устройство, которое преобразует электрическую энергию подаваемого тока в механическую энергию перекачиваемой жидкости. Инвертируя принцип работы МГД–насоса в 1910 году Карловицом и Халацем был изобретен и запатентован МГД–генератор.

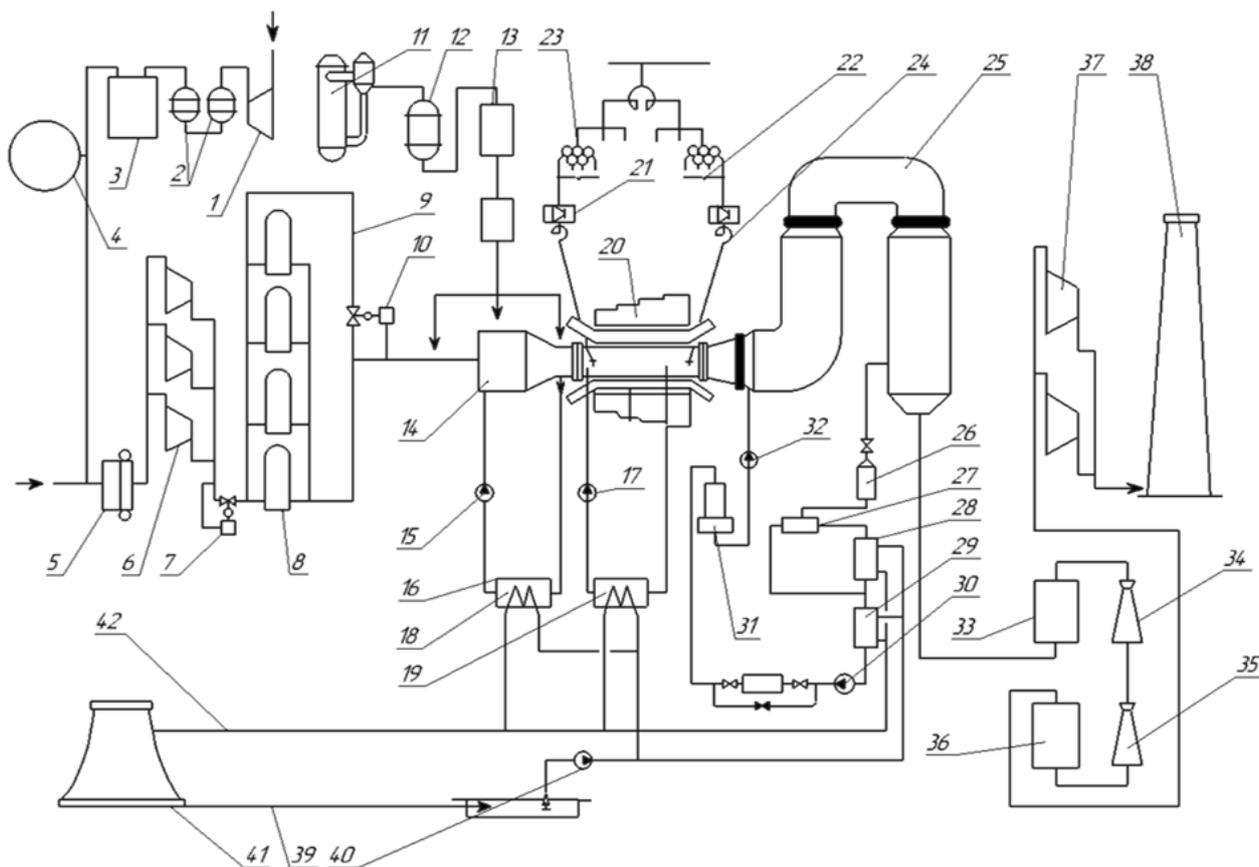
В 1930 году Уильямс опубликовал результаты первых лабораторных исследований МГД течений в трубах и каналах. Полное теоретическое исследование этого предмета было проведено Гартманом и Лазарем в 1936 и 1937 годах. В начале 40-х годов компания *Westinghouse Electric Corp.* построила большой и в то же время сложный МГД–генератор на основе эффекта Холла, который вышел из строя из-за недостаточного знания свойств ионизированных газов. Исследования плазмы в 1950-х годах создали достаточный банк данных этих свойств [8].

Спустя десятилетие появилась опытно-промышленная установка «Марк–V» в США мощностью 32 МВт. Вслед за этим в СССР, европейских странах, а затем в Японии начали проводиться исследования по созданию МГД–генераторов на неравновесной плазме с целью их использования в замкнутых циклах Брайтона и Ренкина с высокотемпературными ядерными реакторами.

Наибольшие успехи в разработке МГД–генератора на неравновесной плазме получены в Японии (МГД–установка *FUJI-I* электрической мощностью до 0,7 МВт. На японских МГД–установках достигнуты значения коэффициента преобразования энергии (к.п.э.) до 21% в МГД–генераторах с дисковыми каналами в стационарном режиме работы (температура газа 2000–2300 К) и до 37% – в импульсном (на ударных трубах). Коэффициент преобразования энергии – это отношение полезной мощности, выработанной в МГД–генераторе к мощности набегающего потока плазмы.

В 1965 году была построена первая электростанция с магнитогидродинамическим генератором в СССР. Это был своего рода пробный образец, на основе которого оттачивались технологии и проводились дополнительные исследования. Первой действительно мощной электростанцией с МГД–генератором явилась установка У–25 (рис. 2), построенная в 1971 году, вырабатывавшая мощность которой была 25 МВт [5].

Установка У–25 работает по следующей схеме. Атмосферный воздух обогащается до 40% кислородом, получаемым на кислородной станции 1–3, сжимается воздухомagnetателями 6 до давления 3,2 ат, подогревается в высокотемпературном регенеративном воздухомagnetателе 8 до температуры 1200–1250°C и подается вместе с ионизирующей присадкой в камеру сгорания 14.



**Рис. 2.** Схема установки У-25:

- 1 – турбокомпрессор; 2 – система азотно-водяного охлаждения; 3 – воздухоразделительный агрегат; 4 – газгольдер; 5 – камера рулонных фильтров; 6 – центробежный воздуходуватель; 7 – автоматический регулятор; 8 – воздушонагреватель; 9 – смесительный воздуховод; 10 – автоматический регулятор; 11 – станция выпаривания; 12 – станция дозирования; 13 – станция распределения; 14 – камера сгорания; 15 – конденсатные насосы; 16 – теплообменники; 17 – МГД-канал; 18 – конденсатные насосы; 19 – теплообменник; 20 – полюсы магнита; 21 – инверторный агрегат; 22 – блоки; 23 – трансформатор; 24 – инверторный агрегат; 25 – прямоточный парогенератор; 26 – редуционно-охладительные установки; 27 – пускосбросный сепаратор; 28 – технологические конденсаторы; 29 – охладители конденсата; 30 – конденсатный насос; 31 – атмосферный деаэратор; 32 – питательные электронасосы; 33 – пенный аппарат; 34, 35 – двухступенчатый турбулентный газопромыватель; 36 – циклон-каплеуловитель; 37 – центробежные дымососы; 38 – дымовая труба; 39 – безнапорный слив; 40 – насосы технической воды; 41 – градирня капельного типа; 42 – напорные водоводы

Образующаяся при сжигании природного газа низкотемпературная плазма с температурой 2500–2550°C разгоняется в сопле камеры сгорания и поступает в линейный секционированный МГД-генератор постоянного тока 17. МГД-генератор имеет железную магнитную систему 20 с индукцией 2 Тл. Электрическая энергия, вырабатываемая генератором, посредством инверторной подстанции 21–24 передается в сеть переменного тока. Выходящая из МГД-генератора плазма с высоким теплосодержанием поступает в парогенератор 25, где ее энергия используется для получения пара с температурой перегрева 540°C и давлением 100 ат. Продукты сгорания с температурой 150°C проходят через гидромеханическую систему вывода присадки 33–36 с эффективностью очистки 99% и дымососом 37 через дымовую трубу 38 выбрасываются в атмосферу [5].

История знает множество примеров международного сотрудничества в области МГД-генераторов. Например, соглашение о сотрудничестве между институтом ядерных исследований в Польше и центра ядерных исследований Сакле во Франции привели к строительству высокотемпературного воздушнонагревателя (до 1200°C).

Правительство Индии при поддержке СССР создало тепловую исследовательскую установку мощностью 15 МВт для изучения инженерных проблем, связанных с открытым циклом МГД-генераторов на основе газификации угля.

*Liaison Group* – совместная советско-американская программа по проектированию и разработке МГД электростанций. Основным вкладом в совместную программу сотрудничества СССР и США стала установка большой американской сверхпроводящей магнитной системы в обводной петле У-25 [6].

В декабре 1975 года была проведена совместная советско-американская экспериментальная программа по установке на «AVCO Mark VI» диагностической аппаратуры, произведенной в СССР, для установления зависимости электропроводности плазмы от температуры горения [7].

### ВЫВОДЫ

Несмотря на бурное развитие исследований и заманчивые перспективы в области МГД-генераторов в 1970-е годы, устройства на их основе так и не нашли широкого промышленного применения. Основными препятствиями являются: чрезвычайно жесткие требования к конструкционным материалам из-за высоких температур рабочего тела, необходимость создавать очень сильное магнитное поле, которое может быть получено пропусканием огромных токов по обмоткам из сверхпроводящих материалов (во избежание сильного нагрева обмоток и больших потерь энергии в них). Следствиями являются высокая удельная стоимость установленной мощности и вырабатываемой электроэнергии, малая продолжительность непрерывной работы МГД-генераторов.

К 1990 г. электрическая мощность опытных энергетических МГД-генераторов на продуктах сгорания достигла 21 МВт, время непрерывной работы – примерно 1000 часов, к.п.э. – до 16 %. Разработаны проекты опытно-промышленных МГДЭС: в СССР на природном газе мощностью 500 МВт (доля МГД-генераторов – 200 МВт), в США на угле (300 МВт, штат Монтана).

В 90-х годах прошлого века работы по созданию МГД-генераторов приостановлены в связи с необходимостью больших и дорогостоящих капиталовложений к тому же современные комбинированные установки на ископаемом топливе имеют достаточно высокий КПД.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **А.А. Александров, А.М. Архаров, И.А. Архаров.** Теплотехника: учебное пособие – 5-е изд. – М: МГТУ им. Баумана, 2017. – 876 с. [Aleksandrov A.A., Arkharov A.M., Arkharov I.A. Heat engineering, (in Russian). Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2017]
2. **Ушаков В.Я.** Современные проблемы электроэнергетики: Учебное пособие / В.Я. Ушаков. – Томск: ТПУ. 2014. – 447 с. [V. Ya. Ushakov. Modern problems of electric power industry, (in Russian). Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2014]
3. **Панченко В.П.** Введение в магнетогидродинамическое (МГД) преобразование энергии: Учебное пособие. М: МГТУ им. Баумана, 2011 – 55с. [V.P. Panchenko. Introduction to magnetohydrodynamic (MHD) energy conversion, (in Russian). Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2011]
4. **S. Anghaie G. Saraph** Conceptual Design Analysis of An MHD Power Conversion System for Droplet-Vapor Core Reactors. [Электронный ресурс]. // Florida: IAEA – 1995. P.79. URL: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/30/035/30035787.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/035/30035787.pdf) (дата обращения 29.06.2020). [S. Anghaie G. Saraph (2020, June. 29). Conceptual Design Analysis of An MHD Power Conversion System for Droplet-Vapor Core Reactors. [Online]. Available: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/30/035/30035787.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/035/30035787.pdf)]
5. **Кириллин В. А., Шейндлин А. Е.** Некоторые итоги исследования энергетической МГД установки У-25, // Теплофизика высоких температур. 1974. Т.12, №2. С.372–389. [V. A. Kirillin, A. E. Shejndlin, «Some results of the research of the u-25 power MHD unit» (in Russian), in Teplofizika vysokikh temperatur, Vol. 12, no 2. pp.372-389, 1974]

6. **V. Chernyshev.** International Cooperation in MHD Electrical. Power Generation //IAEA BULLETIN – 1978. Vol.20, – №1. – pp. 50–53. [V. Chernyshev. International Cooperation in MHD Electrical. Power Generation //IAEA BULLETIN – 1978. Vol.20, – №1. – pp. 50–53.]

7. **Robert C. Seamans, Jr., Phillip C. White** Fossil Energy Program Report 1975–1976. Washington, D.C.: U.S. Energy Research and Development Administration, 1976. – P. 377. [Robert C. Seamans, Jr., Phillip C. White Fossil Energy Program Report 1975–1976. Washington, D.C.: U.S. Energy Research and Development Administration, 1976. – P. 377]

8. **Арбеков А.Н., Вараксин А.Ю., Иванов В.Л.** Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок: Учебное пособие. – 4-е, изд.– М: МГТУ им. Баумана, 2017. – 678 с. [A.N. Arbekov, A.Yu. Varaksin, V.L. Ivanov. Theory and design of gas turbine and combined plants, (in Russian). Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2017.]

#### ОБ АВТОРАХ

**ШАХМЕТОВ Дамир Азатович**, студент 3 курса УГАТУ, специальности теплоэнергетика и теплотехника, кафедры АТиТ, группа ТЭТ-410

**КИШАЛОВ Александр Евгеньевич**, доц. каф. АТ и Т УГАТУ, дипл. инж. по авиационным двигателям и энергетическим установкам (УГАТУ, 2006), к.т.н. по тепловым, электроракетным двигателям и энергоустановкам ЛА (УГАТУ, 2010). Исследования в области рабочих процессов в авиационных ГТД на установившихся и неустановившихся режимах, разработки математических моделей сложных технических объектов, САПР авиационных ГТД.

#### METADATA

**Title:** On the question of magnetohydrodynamic energy conversion.

**Authors:** D. A. Shayakhmetov <sup>1</sup>, A. E. Kishalov <sup>2</sup>

**Affiliation:** Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup> troukles@yandex.ru, <sup>2</sup> kishalov@ufanet.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 2 (25), pp. 109-115, 2021. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** The article is devoted to the review of the magnetohydrodynamic method of energy conversion to increase efficiency in power generation without increase in temperature prior to moving mechanical parts, which allows you to save their resource. The physical laws and properties based on which the MHD generator was developed are described. We consider the schematic diagram of a MHD generator with a Faraday linear channel, as well as the advantages and disadvantages of this method of energy conversion. The Soviet experience of building a power plant with a u-25 MHD installation, and many international stations. International cooperation and research of generators. The efficiency of current installations and prospects for the development of magnetohydrodynamic energy conversion in the future are analyzed.

**Key words:** Power engineering; magnetohydrodynamic generator; Faraday's law; EMF; U-25; mark-V, power generation, CHP

**About authors:**

**SHAYAKHMETOV, Damir Azatovich**, 3rd year student of USATU, specialty heat and power engineering, Department of Atit, TET-410 group

**KISHALOV, Aleksandr Evgenievich**, associate professor of the department of aviation heat power engineering, USATU, Graduate engineer of aircraft engines and power plants (USATU, 2006). Cand. Sci. (Eng.) (USATU, 2010) by thermal, electrical rocket engines and power plants of aircraft. Research in the field of processes occurring in the aircraft GTE, development of mathematical models of complex technical objects.