

На правах рукописи

ГАБРИЕЛЯН Давид Александрович

**МАГНИТНАЯ СИСТЕМА
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ
НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ**

Специальность 05.14.08
«Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2013

Работа выполнена в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) (МАИ)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Семенов Василий Васильевич

Официальные оппоненты:

Графкина Марина Владимировна
доктор технических наук, профессор,
Московский государственный машиностроительный
университет (МАМИ), зав. кафедрой «Экология и
безопасность жизнедеятельности»

Иванов Игорь Эдуардович
кандидат физико-математических наук,
Московский государственный университет (МГУ),
доцент.

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Центральный институт авиационного
моторостроения имени П.И. Баранова (ЦИАМ)»

Защита состоится «18» ноября 2013 г. в 13 час 00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (МАИ).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (МАИ).

Автореферат разослан «17» октября 2013 г.

Учёный секретарь
д.т.н., профессор



Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Для совершенствования и широкого применения в народном хозяйстве спутниковых систем необходимо создание крупных орбитальных пилотируемых и промышленных комплексов. Создание таких комплексов во многом зависит от ее системы электроснабжения, которая существенно влияет на общую массу станции, надежность и управление, а также на её стоимость. Так, с усложнением решаемых задач и увеличением срока активного существования космических аппаратов резко возрастают потребности их бортовой аппаратуры в энергии.

Существующие различные источники электрической энергии и преобразователи, такие как фотоэлектронные преобразователи солнечной энергии – кремниевые элементы (8x8 см) с электрохимическим накоплением энергии (никель-кадмиевые и никель-водородные батареи); источники, построенные на преобразовании солнечной энергии в тепловую с термическим накоплением энергии путем генерации кислорода и водорода в процессе электролиза воды; атомные энергетические установки имеют ряд недостатков. Так, фотоэлектронные преобразователи имеют низкий КПД, а метод накопления электрической энергии имеет низкую эффективность и надежность. Для атомных станций необходим массивный экран для защиты от радиации. Таким образом, для обеспечения растущей потребности в электроэнергии космических станций следует совершенствовать систему их энергопитания и искать новые направления развития космической энергетики.

В развитии экологически безопасных технологий преобразования энергии все большее распространение получают энергетические установки, основанные на магнитотепловых явлениях. Эти явления были обнаружены еще в 1881 г. Е. Варбургом, наблюдавшим нагрев железа при внесении его в магнитное поле.

В настоящее время под магнитотепловыми явлениями понимают изменение теплового состояния магнетиков (внутренней энергии, температуры) при изменении их магнитного состояния, включая магнитокалорический эффект (МКЭ), потери энергии при магнитном гистерезисе и изменении их теплофизических характеристик.

Работа посвящена актуальной проблеме создания альтернативных источников электропитания в области энергетического обеспечения космических систем, а также в авиации для создания систем автономного энергообеспечения. Одним из таких источников электропитания может стать теплоэнергетическая установка на постоянных магнитах – магнитотепловой двигатель (МТД), использующий для своей работы эффект преобразования магнитотепловой энергии в механическую и/или электрическую. По сравнению с современными фотоэлементами и термоэлектрическими преобразователями магнитотепловые двигатели обладают большей снимаемой удельной механической мощностью, что позволяет использовать их в тех условиях (диапазон рабочих температур $\Delta t = 20 \pm 5$ °C), где другие известные технологии преобразования энергии не дают ощутимого выхода.

Принцип работы установки магнитотепловой технологии основан на зависимости магнитных свойств рабочего тела (ферро- и ферритмагнетиков) от температуры.

С открытием Пьером Кюри (1895 г.) температуры (точки Кюри), при которой ферромагнитные изначально вещества, такие как железо, при нагреве теряли свои магнитные свойства, становясь при этом парамагнитными, возник интерес к изучению данного явления. Открытие магнитных свойств редкоземельного металла – гадолиния (Gd), у которого точка Кюри лежит в пределах комнатной температуры

(18...20°C), дало возможность пересмотреть магнитотепловую технологию. С этого момента возникло множество работ с различными вариантами конструктивного решения и попытками создания магнитотепловой установки, предназначенной для преобразования магнитотепловой энергии в механическую или электрическую.

За рубежом исследованием магнитотепловой технологии и созданием магнитотеплового двигателя занимались Тесла Н., Эдисон Т., Эллиот Дж.Ф. (США); Катаяма А. (Япония), Бьерк Р., (Дания); Роудант Дж., Боучекара Х.Р. (Франция); Китановский А., (Словения); Трапанезе М., (Италия) и др., а в России – Бедбенев В.С., Манджавидзе А.Г., Бучельников В.Д. и др.

Работа МТД основана на использовании запасенной энергии постоянных магнитов, на способности магнитотвердого материала быть источником магнитного поля на длительное время и возможности магнитомягкого материала (ферромагнетика) многократно намагничиваться и размагничиваться. Несмотря на то, что электромагниты позволяют получить большие значения магнитной индукции, в ряде случаев использование постоянных магнитов предпочтительнее, т.к. они не требуют системы охлаждения, просты по конструкции и надежны в эксплуатации. Таким образом, постоянные магниты являются основными источниками магнитного поля для компактных современных устройств и систем.

Как известно, на мусоросжигательных заводах, компрессорных станциях, ТЭС и других предприятиях используется оборотная вода для охлаждения камер сгорания, блоков цилиндров или образования пара, идущего на раскрутку лопаток турбины. Для утилизации теплоты оборотной воды, после использования ставшей горячей, как нельзя кстати подойдет магнитотепловой двигатель, использующий горячую воду для размагничивания гадолиниевых пластин, расположенных между магнитами.

Кроме того, в Сибири, особенно, на Крайнем Севере оленеводы, охотники и геологи, работающие в полевых условиях, остро нуждаются в неприхотливых портативных электрических станциях, работающих на альтернативном топливе. Для этой цели лучше всего подошел бы магнитотепловой двигатель, использующий для нагрева гадолиниевых пластин горячую воду, нагретую на походной металлической печи, а для охлаждения пластин – холодный воздух, подведенный по трубе с улицы.

Несмотря на большое количество научных исследований в этой области, разработок и патентов, опубликованных за последнее время, нет существенных результатов, позволяющих создать промышленные образцы двигателей, генераторов и холодильников. Это связано с большим количеством параметров, возникающих по мере проектирования МТД и требующих их оптимизации. Решение этой проблемы видится в проведении численных расчетов с использованием компьютерного моделирования основных узлов установки и прежде всего магнитной системы и ее привязки к магнитным характеристикам рабочего тела.

Цель работы:

разработка магнитной системы для теплоэнергетической установки на постоянных магнитах с целью увеличения её магнитной индукции и вовлечения в градиентное поле межполюсного зазора большей массы рабочего тела – гадолиниевых пластин, приводящих к увеличению крутящего момента на валу ротора и, соответственно, удельной мощности двигателя.

Задачи работы:

1. Разработка методов проектирования магнитной системы (МС) теплоэнергетической установки на постоянных магнитах;

2. Вычислительное и экспериментальное исследования получения неоднородного поля вдоль межполюсного зазора магнитной системы;
3. Модернизация конструкции магнитотеплового двигателя с целью интенсификации теплообмена и увеличения его механической мощности;
4. Разработка рекомендаций по проектированию магнитотеплового двигателя.

Научная новизна работы:

1. Разработаны методы проектирования магнитной системы (МС) теплоэнергетической установки на постоянных магнитах, заключающийся в:
 - создании градиентного распределения магнитного поля вдоль межполюсного зазора (МПЗ) постоянных магнитов (ПМ) путем варьирования ширины сечения ПМ вдоль МПЗ;
 - использовании постоянных магнитов с различной остаточной намагниченностью таких, как АЛНИКО и твердые ферриты в сочетании с магнитами на редкоземельной основе, что экономически оправданно из-за высокой стоимости магнитов на редкоземельной основе.
2. На основе численного моделирования магнитной системы с использованием двух- и трехмерной геометрии определены оптимальные размеры постоянных магнитов в соотношении 1:0,7:0,8 и геометрии межполюсного зазора (угол сужения $\alpha = 26^\circ \div 36^\circ$, отношение длины прямого участка к всей длине зазора 0,2 : 1).
3. Предложена новая конструкция теплоэнергетической установки на постоянных магнитах. Новизна конструкции подтверждена патентами РФ на полезную модель №№ 118369, 121873 (2012 г.); заявка RU 2013110771 решение о выдаче патента 2013.08.05.

Практическая значимость результатов работы:

1. Применение разработанной магнитной системы существенно повысит эффективность преобразования энергии на теплоэнергетической установке на постоянных магнитах, что приведет к увеличению её мощности.
2. Ведутся переговоры на заключение договора на НИР между МАИ и Академией наук Республики Саха (Якутия) на разработку модельного МТД мощностью 250 ватт.
3. На кафедре «Ракетные двигатели» МАИ создана установка для определения мощности, создаваемой лабораторной моделью МТД. На установке проводятся лабораторные работы по курсу «Энергосберегающие системы и устройства» со студентами старших курсов и научно-исследовательская работа по изучению характеристик МТД.

Достоверность результатов работы обеспечена:

- использованием современных математических методов и сертифицированной программы ANSYS для решения прикладных задач магнитостатики;
- согласованием результатов численного моделирования с результатами экспериментальных измерений на стенде с использованием динамометра для измерения возникающей силы магнитного притяжения при использовании тестируемых ферромагнитных материалов;
- согласованием результатов расчета с экспериментальными данными, полученными при испытании лабораторной модели магнитотеплового двигателя.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в работе, получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии.

Публикации, отражающие полноту изложения материалов диссертации:

По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ, в том числе 2 публикации в журналах из перечня ВАК и 2 патента на полезную модель РФ.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы обсуждены на:

- 9-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2010», тема доклада «Альтернативная энергетика. Магнитотепловой двигатель (МТД)». Россия, Москва, 2010 г.
- 4th European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS), доклад «Computer simulation usage for thermodynamic signature analyze of thermomagnetic engine». Россия, С-Петербург, 2011 г.
- Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике - 2012», тема доклада «Исследование теплофизических характеристик магнитотеплового двигателя». Россия, Москва, 2012 г.
- IX Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2012), тема доклада «Использование компьютерного моделирования для исследования термодинамических характеристик магнитотеплового двигателя». Украина, Алушта, 2012 г.
- 63 the International Astronautical Congress (IAC 2012), тема доклада «Thermomagnetic engine (ТМЕ)». Италия, Неаполь, 2012 г.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами по главам и общих выводов, списка использованных источников. Объём диссертации составляет 158 страниц машинописного текста, в том числе 107 рисунков и 14 таблиц. Библиография диссертации: 84 наименования.

Автор защищает следующие основные положения работы:

1. Метод проектирования магнитной системы теплоэнергетической установки на постоянных магнитах с заданным градиентным распределением магнитного поля вдоль межполюсного зазора при максимально возможном значении магнитной индукции в рабочей зоне за счет варьирования геометрических размеров составляющих ее постоянных магнитов, а также с использованием постоянных магнитов с различной остаточной намагниченностью таких, как АЛНИКО и твердые ферриты в сочетании с магнитами на редкоземельной основе.
2. Результаты вычислительных и экспериментальных исследований варьирования линейных размеров аксиально намагниченных постоянных магнитов, составляющих магнитную систему, с целью оптимизации величины магнитной индукции на их рабочих поверхностях с учетом массогабаритных характеристик каждого из них.
3. Новую конструкцию теплоэнергетической установки на постоянных магнитах, в которой роторный диск выполнен из цельного немагнитного, теплоизоляционного материала с вырезами в его средней части, а активные рабочие элементы (АРЭ) – гадолиниевые пластины установлены по периметру диска ребрами, выступающими за его пределы.

ОСНОВНЫЕ ТЕЗИСЫ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, показана научная новизна, практическая и научная значимость полученных результатов. Приведены сведения о структуре и содержании диссертации.

В главе 1 диссертации приведены:

- обзор по проектируемым и созданным моделям магнитотепловых энергетических установок (двигателям, генераторам и холодильникам);
- обзор по существующим МС магнитотепловых установок;

- определены требования к проектированию МС для магнитотепловых двигателей и сформулированы цели и задачи диссертации.

Сразу же после опытов проведенных Е. Варбургом (1881г.) такие ученые как Н. Тесла (1889г.) (рисунок 1) и Т.Эдисон (1888г.) попытались использовать этот эффект в практических целях. Однако из-за недостаточной базы данных по магнитным материалам в то время им не удалось успешно реализовать свои идеи. В дальнейшем с развитием исследований в области магнитных материалов и их свойств, обнаружением МКЭ у ряда магнетиков, созданием технологий получения высококоэрцитивных постоянных магнитов, исследователи вернулись к вопросам использования этих эффектов в технике.

На практике МКЭ реализуется путем перемещения рабочего тела магнетика из зоны сильного магнитного поля, в зону слабого или практически нулевого поля. При этом процесс сопровождается отводом выделенного тепла в зоне сильного магнитного поля, с последующим охлаждением магнетика в зоне нулевого поля, в результате его адиабатического размагничивания.

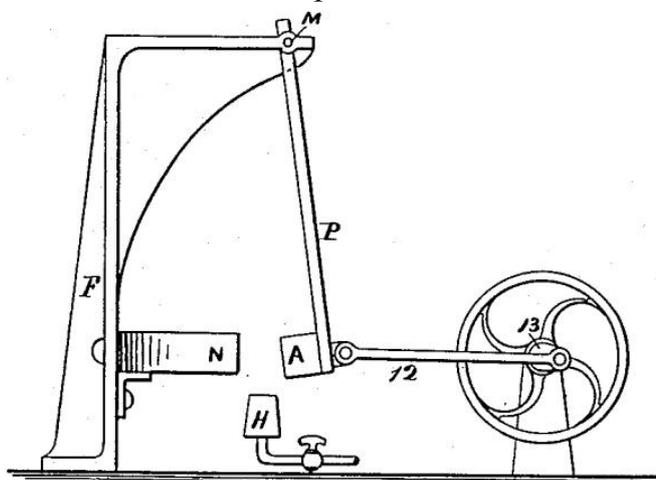


Рисунок 1 - Одно из конструктивных решений магнитотеплового мотора Н. Теслы патент США № 396121

решение МТД (рисунок 2). Установка содержит размещенный на валу ротор с активными элементами, установленными по периферии, статор, источник тепловой энергии и магнитную систему с постоянными магнитами.

МТД снабжено узлом разгона, при этом ротор выполнен из двух дисков 3, взаимосвязанных между собой по периферии посредством узла разгона. Статор 6 установлен на валу 4 между дисками 3, причем постоянные магниты 7, 8 и 9 магнитной системы установлены с образованием межполюсных зазоров, а активные элементы объединены 13 в рабочие сборки с образованием кольцевых поясов, размещенных в межполюсных зазорах магнитной системы. Конструкция установки позволяет расширять его функциональные возможности и увеличивать снимаемую мощность. В основе представленной установки лежит необходимость в проработке и оптимизации каждой детали и узла двигателя. Прежде всего, это подбор и оптимизация источников магнитного поля; моделирование задач теплообмена и обтекания активных рабочих элементов, оптимизация режимов работы; сокращение энергетических потерь на вращение и на передачу тепла.

В работах, посвященных созданию магнитотеплового двигателя, рассматривается термодинамически обратное МКЭ явление, сопровождающееся не отводом тепла, а его подводом к магнетик, причем в присутствии градиентного распределения магнитного поля, приводящего к скачку намагниченности. Это явление в технике получило название термомагнитного эффекта, а теплоэнергетическая установка, использующая его – магнитотепловой двигатель.

В работе Бедбенова В.С. 2000г. предлагается иное конструктивное

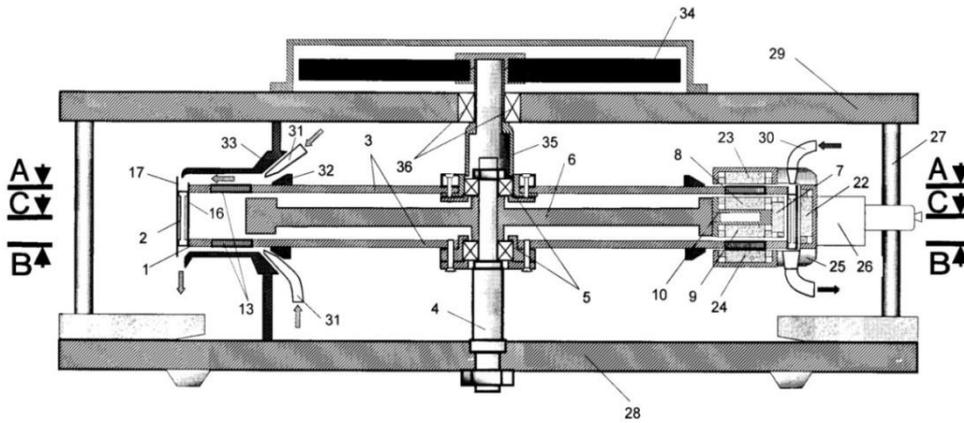


Рисунок 2 - Схема магнитотеплового двигателя Бедбенова В.С.

Работа магнитотеплового двигателя (МТД) основана на зависимости магнитных свойств рабочего тела (ферро- и ферромагнетиков) от температуры. Ниже на рисунке 3 схематически представлен принцип работы МТД. Ферромагнитное рабочее тело 2 по мере вхождения в магнитное поле, образованное постоянными магнитами 1, спонтанно намагничивается и на него начинает действовать сила притяжения F_1 , которая движет ферромагнетик вдоль градиента магнитной индукции. Для компенсации тормозящей силы F_2 , не позволяющей рабочему телу покинуть межполюсный зазор 3, производится тепловое воздействие на рабочее тело. Изменение намагниченности тела приводит к нарушению равенства сил F_1 и F_2 и рабочее тело приобретает однонаправленное движение, покидая магнитное поле. Особенно сильно этот эффект проявляется в точке Кюри T_c , в окрестностях магнитного фазового перехода магнетика из ферромагнитного в парамагнитное состояние (рисунок 4). С целью организации вращательного движения элементы рабочего тела выстроены по круговой траектории. Действующая на рабочее тело сила дается следующим выражением:

$$F_{mag} = m \cdot \Delta\sigma(H, \Delta T) \cdot dB/dx \quad (1)$$

где $m \cdot \Delta\sigma(H, \Delta T)$ – есть магнитный момент рабочего тела массой m , приобретенный в поле H при перепаде температуры ΔT ; $\sigma(H, T)$ – удельная намагниченность рабочего тела, которая зависит от напряженности внешнего магнитного поля H и температуры рабочего тела T ; dB/dx – градиент магнитной индукции вдоль направления движения.

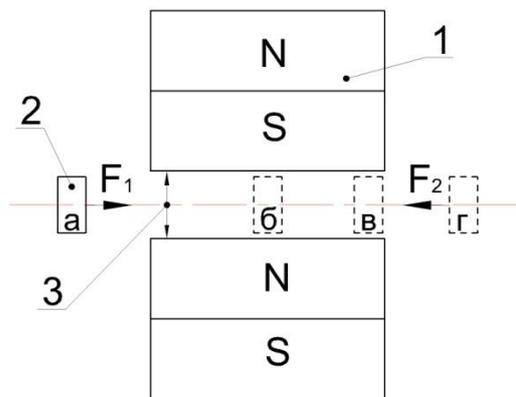


Рисунок 3 - Принцип работы МТД. 1 – постоянные магниты; 2- рабочее ферромагнитное тело; 3 – межполюсный зазор.

На рисунке 4 приведена зависимость величины удельной намагниченности кристаллического гадолиния для различных величин напряженности магнитного поля от температуры. Как следует из кривой, наиболее сильная зависимость от температуры наблюдается в точке Кюри T_c , расположенной вблизи комнатных температур.

Диапазон перепада ΔT определяет величину скачка намагниченности, что в свою очередь

определяет величину действующей силы F (Бедбенев В.С. 1987г.). Сравнительный анализ существующих методов преобразования энергии (глава 4 с.135) показывает, что при использовании МТД имеется практическая возможность использования неисчерпаемого запаса низкопотенциальной энергии окружающей среды. МТД обладают по сравнению с фотоэлементами и термоэлектрическими преобразователями более высокой снимаемой удельной механической мощностью.

Создание существенной мощности при малых уровнях и перепадах температур позволяет использовать магнитотепловые двигатели в тех условиях, где другие известные технологии преобразования энергии не дают ощутимого выхода.

Результаты предварительного численного моделирования магнитостатики МС различной формы и размеров, а так же экспериментальные данные полученные с помощью демонстрационной модели магнитотеплового двигателя показали, что при близком к однородному распределению магнитной индукции в межполюсном зазоре (что имеет место в МС состоящих из двух ПМ) МС имеет ряд существенных недостатков (глава 1, с.43).

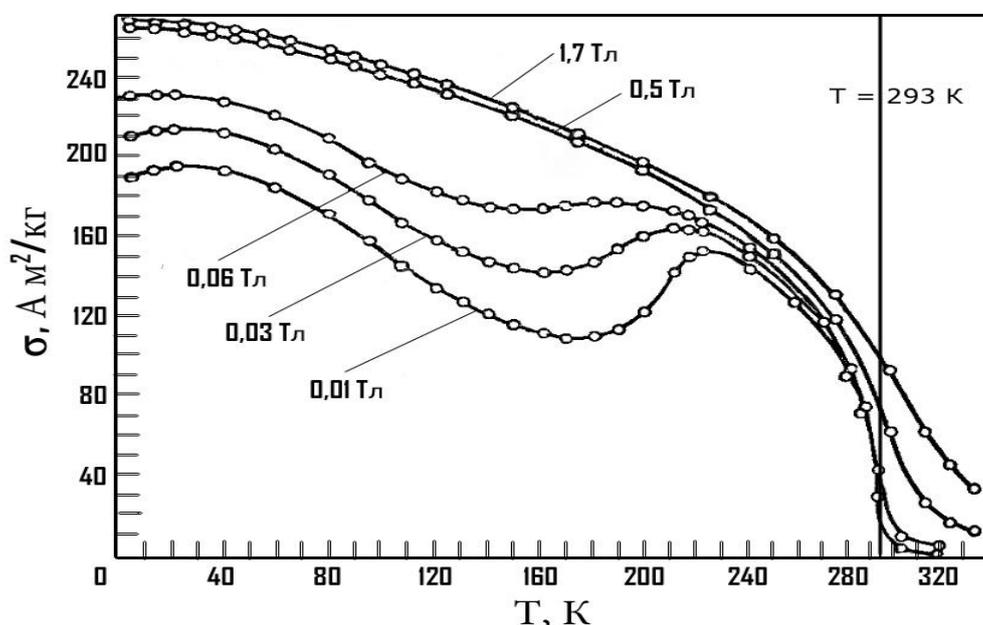


Рисунок 4 - Зависимость удельной намагниченности кристаллического гадолиния Gd от температуры нагрева (Григорьев И.С., 1991).

Анализ полученных результатов показал, что МС, предназначенная для МТД должна отвечать следующим требованиям:

- быть способной обеспечить достаточно высокое значение магнитной индукции в рабочей зоне магнитной системы ($\geq 0,8$ Тл);
- обеспечить в рабочей зоне магнитной системы непрерывный рост величины магнитной индукции на всем протяжении МПЗ с целью захвата в область магнитного притяжения большего количества активных рабочих элементов — гадолиниевых пластин;
- обеспечить резкий спад величины магнитной индукции на выходе из системы для уменьшения длины участка, обладающего обратным притяжением.

В главе 2 представлены:

- математическая модель и алгоритм численного решения основополагающих уравнений, используемых в программном комплексе ANSYS (номер лицензии № 632255);

- результаты тестовых расчетов для оценки возможности применения расчетного пакета ANSYS к поставленным задачам;
- экспериментальные данные измеренных значений сил магнитного притяжения ферромагнитного образца малых (точечных) размеров, полученные для простой магнитной системы с целью сравнения с результатами расчета.

Математическим описанием непрерывных в пространстве и во времени процессов электромагнитного поля являются дифференциальные уравнения в частных производных. Эти уравнения получают относительно характеристик поля из преобразования уравнений Максвелла. Стационарные процессы в данном случае описываются краевыми задачами для уравнений Лапласа и Пуассона. В декартовой системе координат уравнение Лапласа имеет вид:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} , \quad (2)$$

где $\varphi(x, y, z)$ – скалярная искомая функция.

Уравнение Пуассона для изотропных сред имеет вид:

$$\nabla^2 \bar{A} = -\mu_a \bar{J} , \quad (3)$$

где \bar{A} - векторный магнитный потенциал, \bar{J} – вектор плотности тока, $\mu_a = \mu\mu_0$ – абсолютная магнитная проницаемость среды моделирования.

Для анизотропной среды, т.е. $\mu \neq \text{const}$, решают следующее преобразование уравнения Максвелла:

$$\text{rot} \frac{1}{\mu} \text{rot} \bar{A} = \mu_0 \bar{J} , \quad (4)$$

или

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \bar{A} + \text{grad} \left(\frac{1}{\mu} \right) \text{rot} \bar{A} = \mu_0 \bar{J} , \quad (5)$$

Потенциал \bar{A} есть величина векторная и в декартовой системе координат имеет три составляющие по осям, так же как и вектор плотности тока \bar{J} . В таком случае уравнение Пуассона раскладывается на три составляющие по скалярным величинам вектора потенциала A_x, A_y, A_z . Зная распределение вектора магнитного потенциала по области моделирования, можно определить результирующее значение вектора магнитной индукции.

Сравнительный анализ результатов тестовых расчетов и экспериментальных данных, полученных с измерительного стенда, показал, что решение поставленных задач с использованием комплекса ANSYS позволяет добиться достоверных результатов.

С целью оптимизации размеров постоянных магнитов (ПМ) был проведен комплекс расчетов по распределению напряженности магнитного поля для плоскопараллельной МС, выполненной из двух одинаковых ПМ, разнополюсно обращенных друг к другу при фиксированном межполюсном зазоре (МПЗ).

Один из линейных размеров ПМ, образующих МС, определяется исходя из геометрических параметров АРЭ и роторного диска МТД, и является наперед заданной величиной. Для определения соотношений размеров сторон ПМ в безразмерном виде проводилась нормирование линейных размеров на единицу.

Задавшись первоначальным значением высоты ПМ, проводилась выборка размера по ширине (рисунок 5).

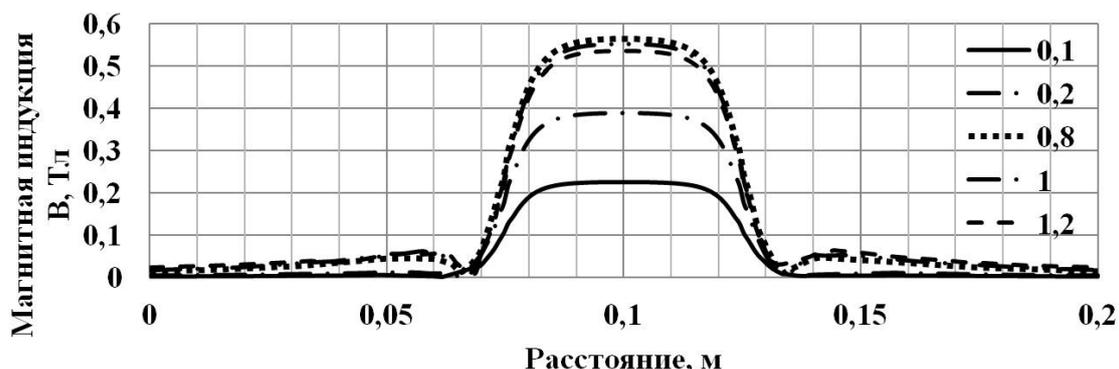


Рисунок 5 - Зависимость магнитной индукции вдоль средней линии МПЗ МС от отношения ширины к длине ПМ (отношение длины к высоте $1 \times 0,5$).

Характер роста магнитной индукции в зависимости от ширины магнитов представлен на рисунке 6. Величина магнитной индукции имеет ярко выраженный рост до значений отношения ширины ПМ к длине, равном 0,4 и максимум – при значениях 0,7. Дальнейшее увеличение ширины приводит к падению значения магнитной индукции. Таким образом, оптимальное соотношение ширины к длине ПМ, образующих МС, лежит в пределах от 0,4 до 0,7 в зависимости от геометрических параметров проектируемой системы.

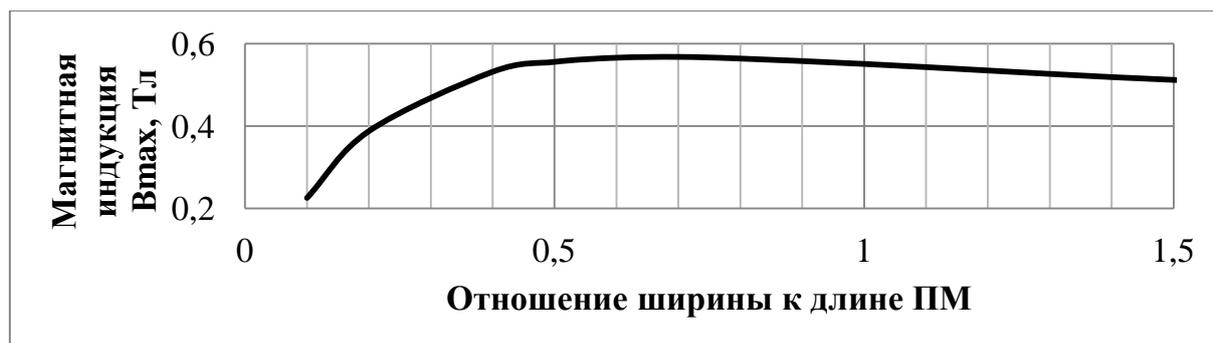


Рисунок 6 - Зависимость магнитной индукции в МПЗ магнитной системы от отношения ширины к длине ПМ (отношение длины к высоте $1 \times 0,5$)

Далее, зафиксировав уже ширину ПМ на уровне максимума величины магнитной индукции, определяли оптимальное соотношение высоты к длине магнита (рисунок 7). Характер роста магнитной индукции в зависимости от высоты магнитов представлен на рисунке 8. Величина магнитной индукции в отличие от предыдущей зависимости не имеет ярко выраженного максимума, а с увеличением высоты ПМ растет.

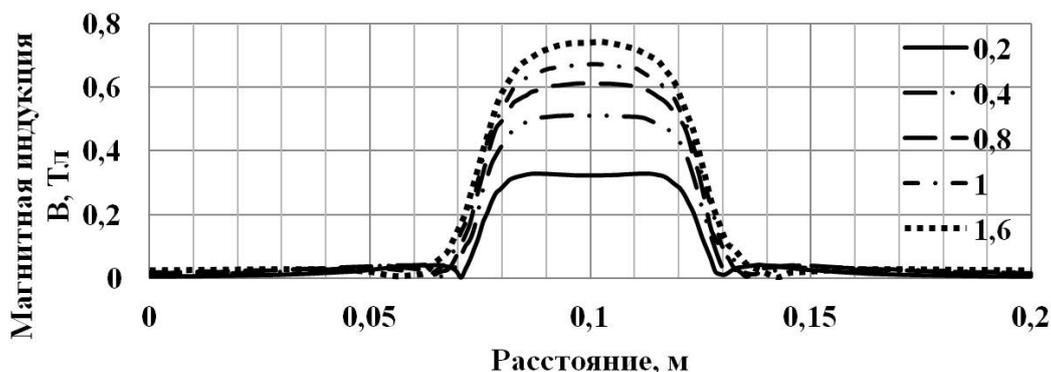


Рисунок 7 - Зависимость магнитной индукции вдоль средней линии МПЗ магнитной системы от отношения высоты к длине ПМ. (отношение длины к высоте $1 \times 0,7$)

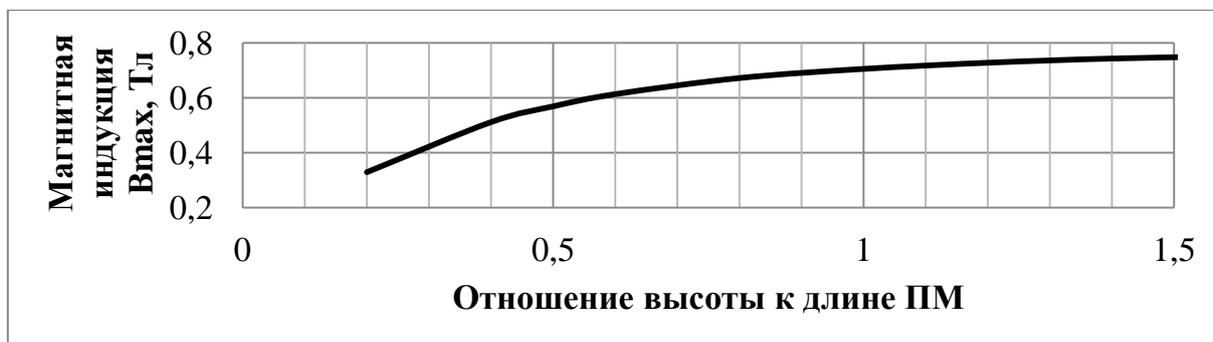


Рисунок 8 - Зависимость максимального значения магнитной индукции в МПЗ МС от отношения высоты к длине ПМ (отношение длины к высоте 1х0,7)

При этом темпы роста магнитной индукции снижаются, что приводит к незначительному повышению величины магнитной индукции при соотношениях высоты к длине ПМ больше 1. Оптимальное с точки зрения массогабаритных размеров и экономической целесообразности соотношение высоты к длине ПМ лежит в диапазоне от 0,8 до 1,2 в зависимости от геометрических параметров проектируемой МС.

На основе кривых представленных на рисунках 5 и 7 определено оптимальное соотношение размеров для ПМ с учетом факторов эффективности, экономичности и компактности. Таким образом, установлено, что оптимальное соотношение размеров аксиально намагниченного ПМ составляет 1: 0,7: 0,8 (длина : ширина : высота).

В главе 3 на базе оптимизационных расчетов проведенных во второй главе с ПМ на редкоземельной основе были разработаны МС плоскопараллельной, клинообразной и конусообразной форм с целью обеспечения наперед заданных требований к магнитным характеристикам проектируемых МС.

Разработка МС с заданным распределением магнитного поля в МПЗ вдоль направления движения рабочего тела достигается за счет использования ПМ с вышеуказанным соотношением сторон двумя способами. В первом способе за счет оптимизации геометрических размеров ПМ, а во втором за счет подбора ПМ с различной остаточной намагниченностью и коэрцитивной силой.

В первом случае магнитная система собирается из ряда ПМ с фиксированной длиной и шириной в соответствии с выбранным оптимальным соотношением, для сохранения геометрии МПЗ вдоль движения рабочего тела, и различной высотой. Так, для получения максимального значения магнитной индукции на выходе из системы необходимо использовать ПМ с большим соотношением высоты к длине, чем в начале системы, напр., равным 1,2. На входе в систему первый ПМ, располагаемый вначале МС, должен создавать магнитное поле достаточное для захвата рабочего тела. В зависимости от массогабаритных размеров МС и используемого рабочего тела высота ПМ на входе в МС может быть ниже оптимального значения и составлять величину 0,3 - 0,6 по отношению к длине ПМ.

На рисунке 9 представлены МС, собранные по первому способу, из трех ПМ с одинаковыми размерами по длине и ширине, и различным по высоте. Компоновка модулей МС может быть выполнена в двух вариантах: с сужающимся МПЗ (рисунок 9а) или с прямым МПЗ (рисунок 9б). Распределения магнитной индукции в МПЗ представленных МС приведены на рисунке 10.

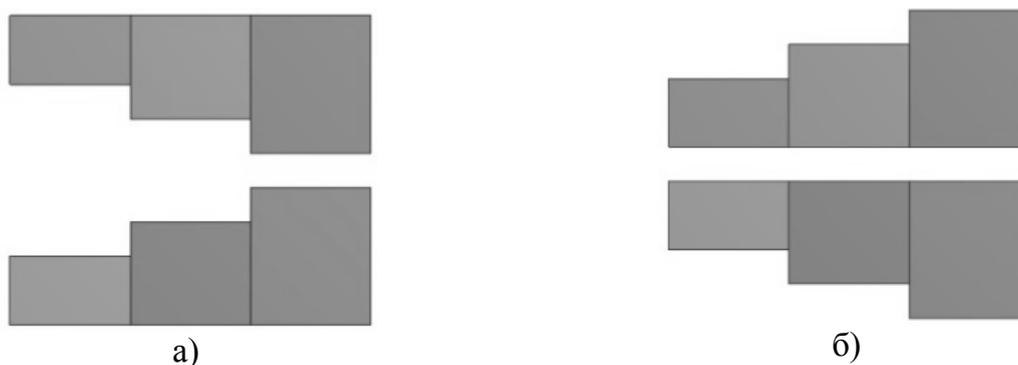


Рисунок 9 - Геометрия МС из трех ПМ с различным размером по высоте в двух вариантах: а) – с сужающимся МПЗ; б) – с прямым МПЗ

На рисунке 10 показано, что помимо большего достигаемого максимального значения B_{max} система а) имеет более выраженный градиент магнитной индукции вдоль МПЗ, чем система б). Это связано с соотношением размеров ПМ, составляющих МС. В данном случае для обоих вариантов применяются следующие соотношения: 1:0,7:0,4; 1:0,7:0,6; 1:0,7:0,8 для каждого из ПМ соответственно. При создании клинообразной формы для варианта а) наблюдается увеличение значений магнитной индукции на входе в систему, что приводит к сглаживанию кривой распределения.

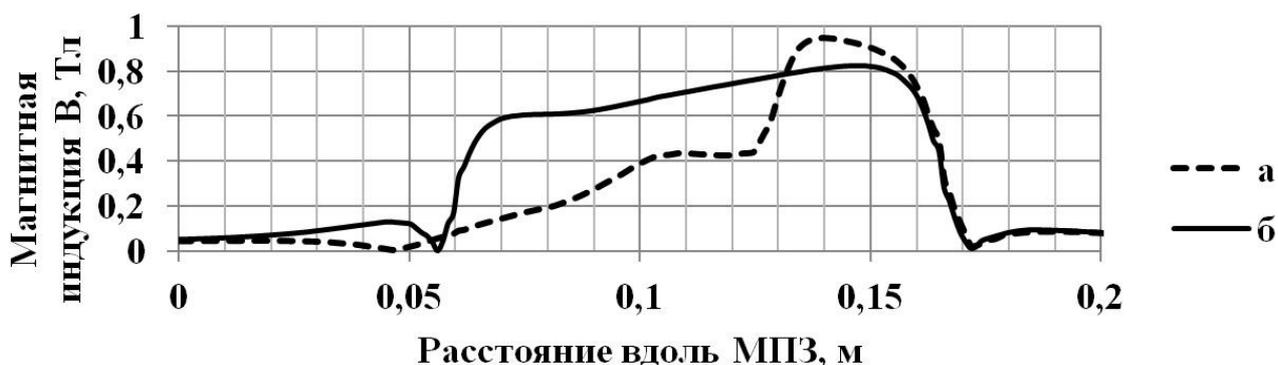


Рисунок 10 - Распределение магнитной индукции в межполюсном зазоре МС, выполненной в двух вариантах, соответствующих вариантам из рисунка 9.

На рисунке 11 представлена система, состоящая из двух ПМ клинообразной формы на входе в МС. Кривая распределения магнитной индукции представлена на рисунке 12.

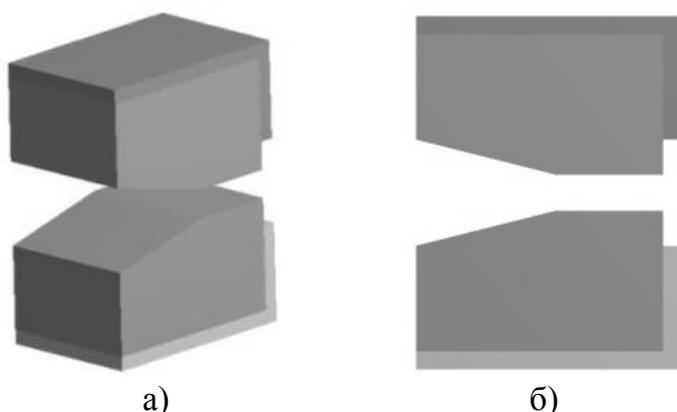


Рисунок 11 - Геометрия линейной МС с клинообразным и прямолинейным участками МПЗ. а – трехмерный вид, б – вид сбоку.

Отметим, во-первых, увеличение максимального значения магнитной индукции по сравнению с аналогичной прямоугольной системой такого же объема на 6%. Во-вторых, увеличение протяженности градиентного магнитного поля на входе в МС с низким значением магнитной индукции, почти вдвое по сравнению с прямоугольной МС. И, в-третьих, сохранен достаточно резкий спад магнитной индукции на выходе из системы.

Экранирование ПМ осуществлено с помощью уголков из электротехнической стали для: защиты ПМ от внешнего воздействия и продления ресурса работы; уменьшения рассеяния генерируемого магнитного поля системой во внешнюю среду, тем самым концентрируя ее в МПЗ; установки и крепления МС на соответствующий узел какого-либо устройства.

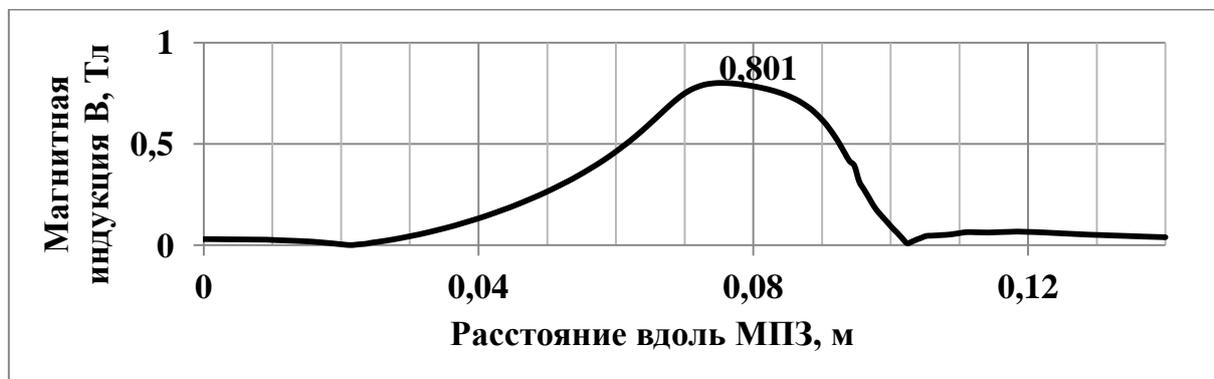


Рисунок 12 - Распределение магнитной индукции в рабочей зоне МС с переменным сечением МПЗ.

Во втором способе получения градиентного распределения магнитной индукции вдоль МПЗ используется сочетание ПМ из различных магнитотвердых материалов. На рисунке 13 представлено семейство кривых, соответствующих распределению магнитной индукции в рабочей области простых МС, которые состоят из ПМ определенного материала. Показана аналогия с изменением распределения магнитной индукции в системах с ПМ различных размеров.

Представленная на рисунке 14 МС состоит из четырех ПМ одного размера, изготовленных из различных материалов (твердые ферриты, спеченный Nd-Fe-B, Sm-Co и синтезированный Nd-Fe-B). Характеристики материалов соответствуют маркам: HF083, BN1210, S3315 и N4816. Распределение магнитной индукции вдоль МПЗ магнитной системы представлено на рисунке 15. ПМ komponуются в модули от самого слабого магнита к самому сильному, образуя изменение магнитных характеристик МС вдоль МПЗ.

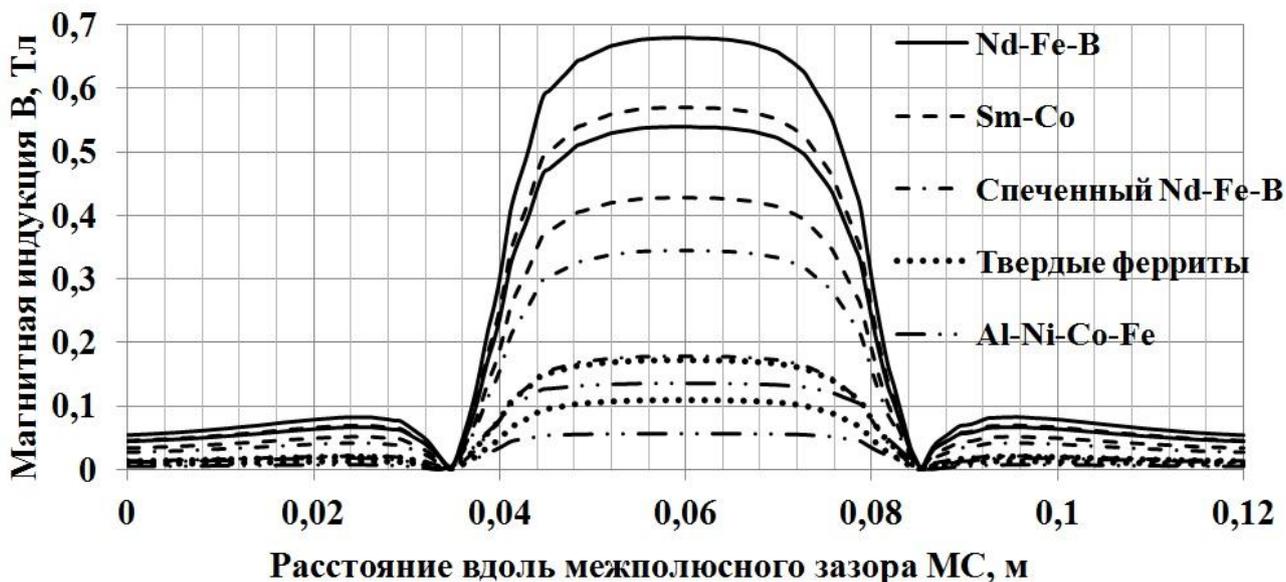


Рисунок 13 - Распределение магнитной индукции вдоль МПЗ магнитной системы в зависимости от материала постоянных магнитов.

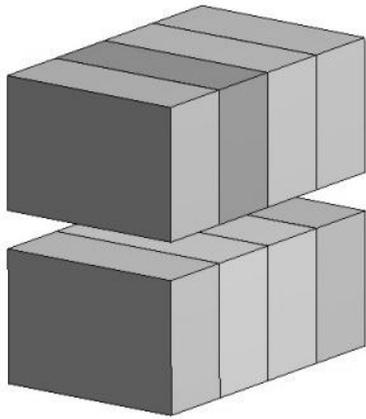


Рисунок 14 - Геометрия магнитной системы из различных материалов

Использование различных марок в сборе МС позволяют увеличить эффективность МС без изменения ее геометрии, что особенно важно в виду общедоступности прямых ПМ как стандартной формы при производстве. Так же стоит отметить, что в зависимости от максимально производимой магнитной энергии (BH_{max}) цены на материалы значительно варьируются. При использовании же маломощных и недорогих ПМ в сборе с мощными и относительно не дешевыми магнитами удастся снизить общую стоимость системы.

Для оценки эффективности той или иной МС для МТД вводится линейный критерий эффективного использования АРЭ в безразмерном виде и обозначается как $l_{эфф}$. $l_{эфф}$ есть отношение длины участка с положительным вдоль МПЗ градиентом магнитной индукции

l_{grad} к общей длине МС $l_{мс}$.

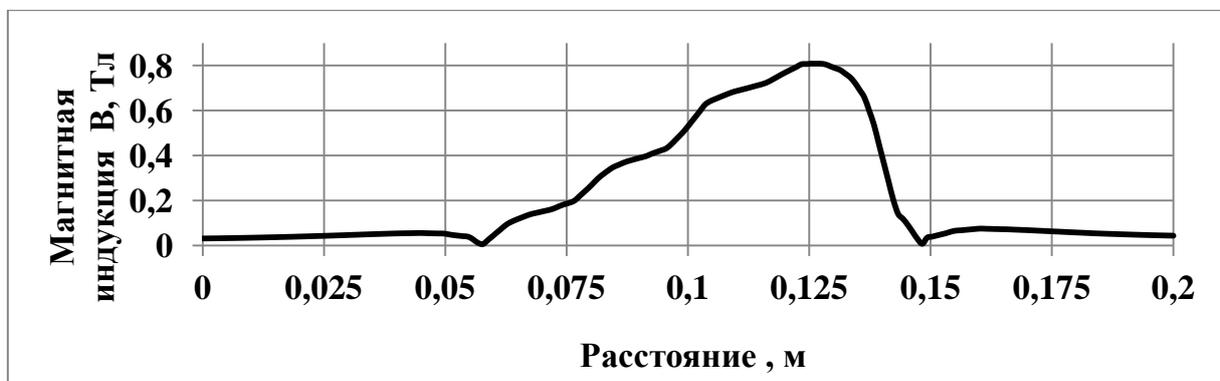


Рисунок 15 - Распределение магнитной индукции вдоль МПЗ магнитной системы из сочетания марок HF083, BN1210, S3315 и N4816.

Однако критерий $l_{эфф}$ не учитывает уровни магнитной индукции, образуемые в МПЗ магнитной системы. Для комплексной оценки эффективности МС необходимо учитывать градиент магнитной индукции, высчитываемый в простой форме:

$$grad(B_x) = (B_{x1} - B_{x2}) / (x_2 - x_1) \quad , \quad (6)$$

где B_{x1} и B_{x2} – значения магнитной индукции соответствующие координатам x_1 и x_2 .

Результаты критериальной оценки каждой разработанной в работе МС для МТД сведены в таблицу 1.

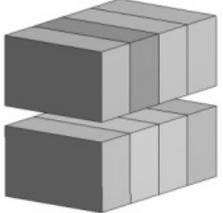
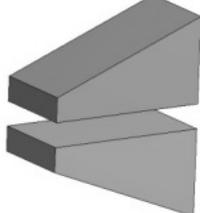
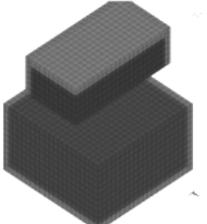
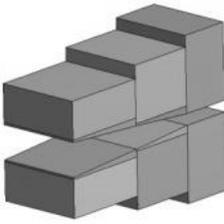
Помимо критериев эффективной длины МС ($l_{эфф}$) и градиента магнитной индукции вдоль МПЗ системы ($grad(B)$), приведенных в таблице 1, необходимо учитывать массогабаритные характеристики системы, сложность ее создания и особенно сборки и возможного способа установки на соответствующий узел МТД.

Из таблицы 1 видно, что магнитные системы № 1, № 4 и № 6 сложны в сборке, кроме того, у МС № 6 возникают еще трудности в создании сложной системы векторов намагниченности структуры Халбаха. Сборка таких магнитных систем затруднительна еще и тем, что возникают большие по величине силы отталкивания друг от друга, а магниты необходимо крепко склеивать друг к другу для достижения заданного распределения магнитного поля. Системы № 2, № 3 и № 5 представляют собой ПМ, имеющие как простую форму, так и несложный способ создания необходимых векто-

ров намагниченности. Системой с наиболее оптимальными критериями $l_{эфф}$ и $grad(B)$ является система № 5, отличающаяся сужающейся частью межполюсного зазора на входе в систему и прямолинейным участком на выходе из нее. Система № 5 собрана всего из двух постоянных магнитов в отличие от системы № 4.

С целью расширения участка вдоль рабочей линии МПЗ (где происходит сужение МПЗ), в пределах которого величина магнитной индукции изменяется от нуля до максимальных значений, и выбора оптимальной длины прямого участка по линии МПЗ, где происходит усиление скачка магнитной индукции на выходе из МС, в диссертации проведена оптимизация по углу сужающейся входной части МС и по длине прямого участка на выходе из нее (глава 3 с.107). Угол α входной части МС варьировался в пределах от 0° до 55° , а отношение длины $l_{прям}$ прямого участка выходной части к длине системы от 0,04 до 0,5 (рисунок 16).

Таблица 1 - Критериальное сравнение магнитных систем.

Магнитная система	$l_{эфф}$	$grad(B)$ Тл/м	Магнитная система	$l_{эфф}$	$grad(B)$ Тл/м
<p>МС №1</p> 	0,925	11,5	<p>МС №2</p> 	0,85	13,48
<p>МС №3</p> 	1,4	8,5	<p>МС №4</p> 	0,85	9,3
<p>МС №5</p> 	0,992	13,38	<p>МС №6</p> 	0,92	15,28

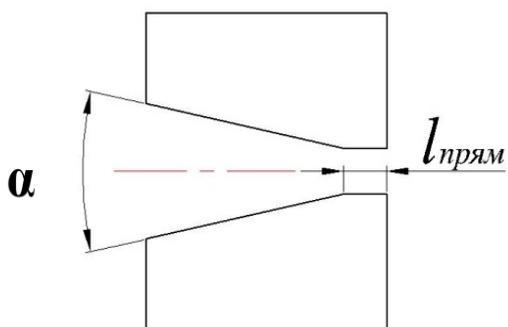


Рисунок 16 - Магнитная система с переменным сечением вдоль межполюсного зазора.

Оптимальный угол сужающейся части, находящийся в диапазоне от 26° до 36° для представленной геометрии МС, и отношение длины прямого участка к всей длине МС – $0,2 : 1$, а так же увеличение высоты ПМ на четверть позволяют получить прирост в V_{max} на 10%. Дальнейшее увеличение в

В главе 4 представлено описание экспериментальной установки для измерения мощности МТД и сравнение их с результатами численного расчета.

На кафедре «Ракетные двигатели» МАИ в 2012 г. для исследования характе-

ристик магнитной системы (МС) была собрана демонстрационная модель, созданная по патенту РФ (RU № 118369 от 2012г.) автором данной диссертационной работы. Схема устройства и фотография демонстрационной модели представлены соответственно на рисунках 17 и 18.

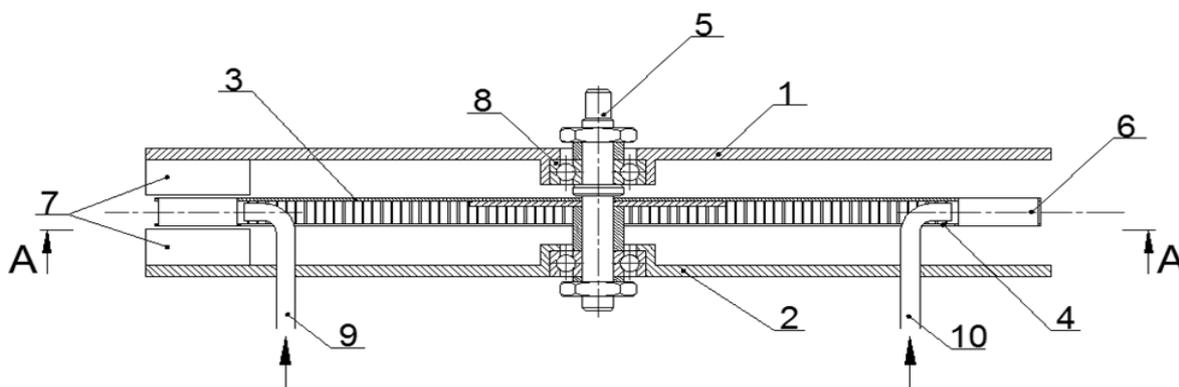


Рисунок 17 - Схема из патента RU № 118369.

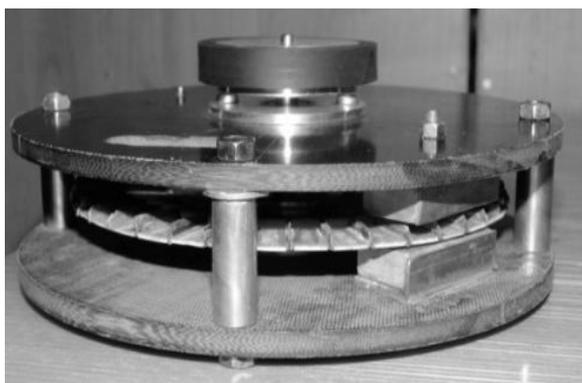


Рисунок 18 - Фотография демонстрационной модели МТД Московского авиационного института (НИУ).

В представленной схеме модели двигателя 1 и 2 – неподвижные опорные плиты, на которых закреплены постоянные магниты (ПМ) 7, образующие МС. В межполюсном зазоре (МПЗ) системы 7 с большой точностью выставлен ротор 3 с нанесенными по его периферии рабочими элементами 6, вращающийся относительно вала 5, под воздействием силы F , возникающей в результате подвода горячего и холодного теплоносителя к входам 9, 10.

Созданная демонстрационная модель МТД используется в учебном процессе при проведении лабораторных работ по дисциплине «Энергосберегающие системы и устройства» для студентов специальности 280202 «Инженерная защита окружающей среды».

Лабораторная модель экспериментальной установки МТД, представлена на рисунке 19.

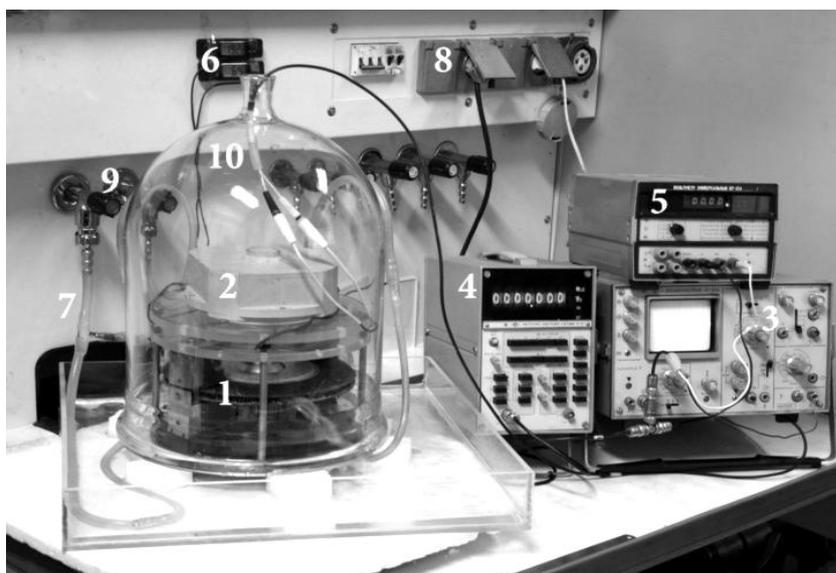


Рисунок 19 – Лабораторная модель экспериментальной установки МТД.

Магнитотеплового двигателя 1 оснащен следующими приборами и оборудованием:

- электрогенератор..... 2
- универсальным осциллографом С1-65А..... 3
- частотомером ЧЗ-57..... 4
- универсальным вольтметром В7-21А. 5
- цифровыми термометрами сопротивления..... 6
- трубопроводами для подвода и отвода теплоносителя..... 7
- электрощитком..... 8
- запорной арматурой подвода теплоносителя.....9
- стеклянным колпаком для визуального наблюдения.....10

Принципиальная схема установки приведена на рисунке 20.

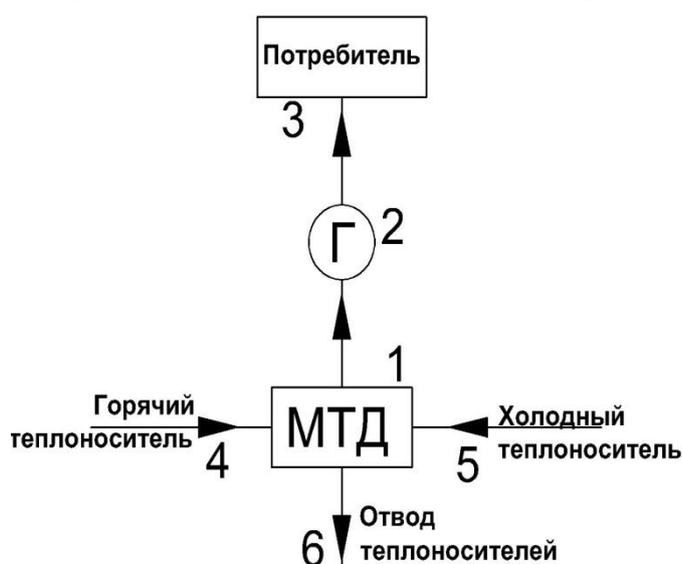


Рисунок 20 - Принципиальная схема установки. 1 – магнитотепловой двигатель; 2 – электрогенератор; 3 – потребитель электрической энергии (приборы различного типа, электрическая сеть и т.д.); 4 – под-

При создании крутящего момента на валу МТД 1 за счет циклического нагрева и охлаждения активных рабочих элементов роторного диска потоками теплоносителей 4 и 5 генерируется электрическая энергия на генераторе 2, которая затем подается потребителю 3. Отработанные в цикле теплоносители отводятся через отвод 6.

Схема измерения приведена на рисунке 21.

Из результатов измерений можно определить момент развиваемой силы на плече, равном среднему радиусу размещения на диске ротора АРЭ $R_{cp} = 0,089$ м, а также величину силы магнитного притяжения.

Характеристики модельного МТД:

- диаметр роторного диска – 220 мм;
- плечо крутящего момента – 89 мм

вод горячего теплоносителя (первичные или вторичные тепловые ресурсы); 5 – подвод холодного теплоносителя (первичные или вторичные тепловые ресурсы); 6 – отвод.

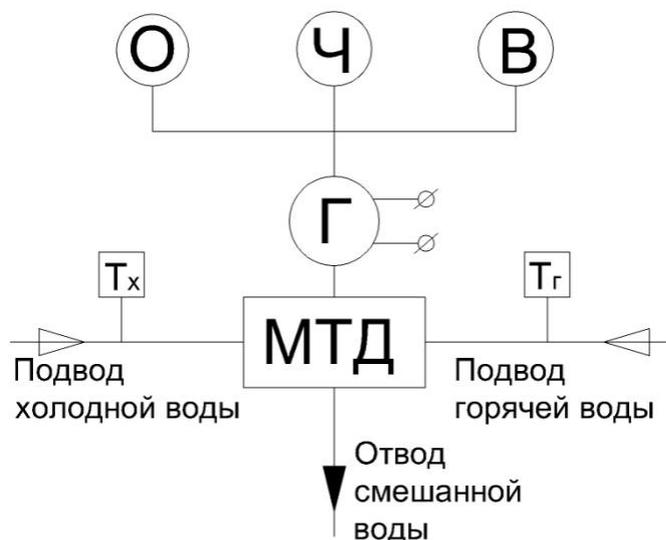


Рисунок 21 - Схема измерения крутящего момента образцованного магнитной системы модельного МТД. О – осциллограф, Ч – частотомер, В – универсальный вольтметр, Г – генератор, МТД – магнитотепловой двигатель, $T_{x,2}$ – цифровые термометры сопротивления.

Показания с генератора снимались тремя устройствами: осциллографом С1-65А, частотомером ЧЗ-57 и универсальным вольтметром В7-21А.

Таблица 2 - Результаты измерений.

Кол-во МС	T_2 °C	T_x °C	$\omega_{x,x}$ сек ⁻¹	ω_n сек ⁻¹	W Вт	M Н·м	F Н
1	55	14	27.6	9.42	6.7	0.71	7.98
2	55	14	30.1	11.3	11.5	1.015	11.4

Обозначения в таблице 2: $T_{2,x}$ - температуры горячей и холодной воды (теплоносителя); $\omega_{x,x}$ – угловая скорость в режиме холостого хода; ω_n – угловая скорость с нагрузкой; W – механическая мощность (пересчитанная с учетом КПД генератора $\eta_2 = 0,9$); M – крутящий момент; F – сила магнитного притяжения активных рабочих элементов к магнитной системе.

Проведенные измерения выходных параметров МТД в зависимости от температур (T_x, T_r) теплоносителя, подаваемых на вход МТД, позволили провести сравнение с расчетными данными. Экспериментально полученное значение мощности при одной

(средний радиус по АРЭ роторного диска);

- АРЭ – гадолиний 99,9 % чистоты;
- размер и количество АРЭ – 36x8x0,5 мм – 96 пластин;
- шаг между АРЭ - 5 мм;
- температура горячего теплоносителя – 55 °С;
- температура холодного теплоносителя – 14 °С;
- постоянные магниты на основе Nd-Fe-B с $B_r = 0,92$ Тл, $H_c = 710$ кА/м;
- размеры ПМ – 50x30x40 мм (аксиальная намагниченность)

Результаты измерений сведены в таблицу 2.

В лабораторной модели двигателя подвод теплоносителя горячей и холодной воды производился из коммунальной сети водоснабжения. При подаче теплоносителей на входы в МТД цифровыми термометрами сопротивления (T_x, T_r) определялись их температуры. На вращающемся валу МТД размещен низкочастотный генератор (Г).

установленной магнитной системе составляла величину $W = 6,7$ Вт, а при двух установленных МС – $W = 11,5$ Вт.

Результаты аналитического расчета представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Результаты расчета магнитной силы и крутящего момента модельного МТД и предлагаемой магнитной системы.

Общие параметры		Магнитная система лабораторной модели			Предлагаемая магнитная система с переменным сечением МПЗ		
Масса АРЭ, т, кг	$\Delta\sigma$, А·м ² /кг	gradB Тл/м	F_p , Н	М, Н·м	gradB Тл/м	F_p , Н	М, Н·м
$1,136 \cdot 10^{-3}$	54,7	26,5	7,86	0,699	13,77	9,59	0,853

Сравнение значений экспериментальных данных и результатов расчетов показывает удовлетворительное их согласование (рисунок 22). Из рисунка 22 видно, что расчетное значение магнитной силы притяжения F_p незначительно отличается от экспериментального $F_{\text{Э}}$, что обусловлено погрешностью графического определения значений перепада удельной намагниченности от температуры.

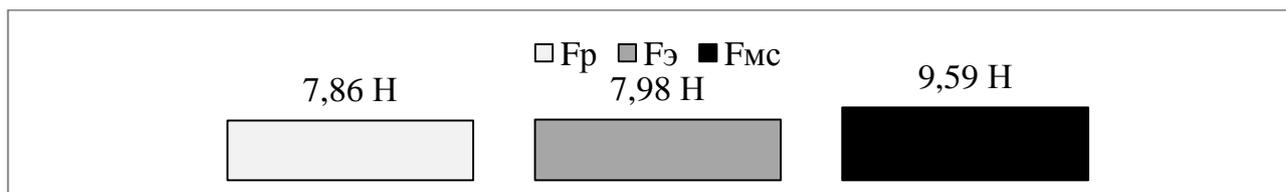


Рисунок 22 - Сравнение теоретических и экспериментального значений магнитной силы притяжения магнитных систем. F_p – расчетное значение силы притяжения МС лабораторной модели; $F_{\text{Э}}$ – экспериментальное значение силы притяжения МС лабораторной модели; $F_{\text{МС}}$ – расчетное значение силы притяжения разработанной МС.

Расчеты показывают (таблица 3, рисунок 22), что при использовании МС клинообразной формы, разработанной в главе 3 настоящей работы, суммарная магнитная сила $F_{\text{МС}}$ на 20% больше, чем у прямоугольной системы, что в итоге приводит к увеличению крутящего момента и механической мощности в целом. Кроме того, установка МС клинообразной формы увеличивает эффективность работы МТД.

Показано, что эффективность работы МТД определяется как отношение снимаемой механической мощности к тепловым затратам. Замена МС не влияет на систему теплообмена МТД, вследствие чего, тепловые затраты остаются прежними, однако, за счет геометрии и подобранных магнитотвердых материалов удастся увеличить снимаемую механическую мощность.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

По итогам работы сделаны следующие выводы:

- 1 Разработан метод проектирования магнитной системы теплоэнергетической установки на постоянных магнитах, заключающийся в:
 - создании градиентного распределения магнитного поля вдоль межполюсного зазора системы путем варьирования геометрических параметров постоянных магнитов;
 - использовании постоянных магнитов с различной остаточной намагниченностью таких, как АЛНИКО и твердые ферриты в сочетании с магнитами на редкоземельной основе.
- 2 На основе численного моделирования магнитной системы с использованием двух- и трехмерной геометрии определены оптимальные размеры постоянных магнитов в соотношении 1:0,7:0,8 и геометрии межполюсного зазора (угол сужения $\alpha = 26^\circ \div 36^\circ$, отношение длины прямого участка к всей длине зазора 0,2 : 1).
- 3 Показана целесообразность использования магнитной системы для теплоэнергетической установки, как на высококоэрцитивных постоянных магнитах (Nd-Fe-B, Sm-Co) с оптимальными линейными размерами в соотношении 1:0,7:0,8, так и на базе магнитного модуля, составленного из различного типа магнитотвердых материалов, подобранных по их магнитным характеристикам.
- 4 Разработаны конструкции магнитной системы теплоэнергетической установки на постоянных магнитах различных форм и геометрических размеров. Установлено, что при использовании магнитной системы с клинообразным межполюсным зазором суммарная магнитная сила на 20% больше, чем у прямоугольной системы.
- 5 Создан лабораторный стенд с модельным магнитотепловым двигателем для измерения выходной механической и электрической мощности в зависимости от установленной в ней магнитной системы. Созданная установка используется на кафедре «Ракетные двигатели» МАИ в учебном процессе по дисциплине «Энергосберегающие системы и устройства».
- 6 Установлено, что результаты вычислительных исследований по определению мощности и крутящего момента магнитной системы удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, полученными при испытании модельного двигателя на стенде.
- 7 Предложена новая конструкция теплоэнергетической установки на постоянных магнитах. Новизна конструкции подтверждена патентами РФ на полезную модель №№ 118369, 121873 (2012 г.); заявка RU 2013110771 решение о выдаче патента 2013.08.05.

Основные положения диссертационной работы опубликованы:

1. Габриелян Д.А. Альтернативная энергетика. Магнитотепловой двигатель (МТД) [Текст] / Д.А. Габриелян // Авиация и космонавтика – 2010: сб. тезисов докладов 9-ой Международной конференции (Москва, 16-18 ноября 2010). – СПб.: ООО «Принт-салон», 2010, – С.211-212 – ISBN 978-5-905176-01-2 .
2. Габриелян Д.А. Исследование теплофизических характеристик магнитотеплового двигателя [Текст] / Д.А. Габриелян, В.В. Семенов // Инновации в авиации и космонавтике – 2012: сб. тезисов докладов Московской молодежной научно-практической конференции (Москва, 17–20 апреля 2012) – СПб.: ООО «Принт-салон», 2012, – С.39 – ISBN 978-5-905176-15-9.

3. Габриелян Д.А. Использование компьютерного моделирования для исследования термодинамических характеристик магнитотеплового двигателя [Текст] / Д.А. Габриелян, В.В. Семенов // NPNJ'2012: Материалы IX Международной конференция по неравновесным процессам в струях и соплах (Алушта, 25-31 мая 2012) - М.: Изд-во МАИ, 2012 – С.548-550 – ISBN 978-5-4316-0063-0.
4. Пат. на полезную модель 118369 Рос. Федерации. Магнитотепловой двигатель [Текст] / Габриелян Д.А.: заявитель и патентообладатель Московский авиационный институт (научный исследовательский университет) (МАИ) (RU) - № 2012110794, заявл. 22.03.2012; опубл. 20.07.2012, Бюл. №20.
5. Габриелян Д.А. Магнитотепловой двигатель. Перспективы развития магнитотепловой технологии. [Текст] / Д.А. Габриелян // Научно-технический вестник Поволжья, 2012, № 2, С.160-166 – ISBN 2079-5920.
6. Габриелян Д.А. Энергетические характеристики магнитотеплового двигателя. [Текст] / Д.А. Габриелян, В.В. Семенов // Современные проблемы окружающей среды и пути решения; под ред. А.В. Соловьева, Т.И. Хуснетдиновой. - М.: ФГБОУ ВПО РГАЗУ. - 2012. – С.65-73 – ISBN 978-5-901240-60-1.
7. Пат. на полезную модель 121873 Рос. Федерации. Магнитотепловой двигатель [Текст] / Габриелян Д.А. Семенов В.В.: заявитель и патентообладатель Московский авиационный институт (научный исследовательский университет) (МАИ) (RU) - № 2012125838, заявл. 21.06.2012; опубл. 10.11.2012, Бюл. №31.
8. Gabrielyan D.A., Thermomagnetic Engine (TME) IAC-12-C3.3.13. [Электронный ресурс] / D.A. Gabrielyan, V.V. Semenov, IAC 2012: сб. труд. 63-й Международный аэрокосмический конгресс. – Неаполь, 2012 г. – 1 CD-ROM. – 63rd IAC International Astronautical Congress - ISSN 1995-6258.
9. Габриелян Д.А. Расчет трехмерного стационарного магнитного поля систем на постоянных магнитах для магнитотеплового двигателя [Текст] / Д.А. Габриелян, В.В. Семенов // Вестник МАИ, 2013, №2. С.106-113 – ISSN 0869-6101.