

Рис. 2. СЭМ-изображение структуры композита  $AMg6-B_4C-W$ : а) без УЗ воздействия б) с УЗ воздействия

Проведённые исследования морфологических и структурных характеристик композитного материала на основе полидисперсных смесей порошков алюминиевой матрицы, вольфрама и карбида бора, а также процессов их консолидации в объёмные образцы, позволяют сделать выводы о том, что применение ультразвуковых колебаний при прессовании способствует повышению относительной плотности. Таким образом, был выявлен режим компактирования, который позволит оптимизировать затраты на достижение максимальной плотности и минимизировать массогабаритные характеристики изделий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспалов В.И. Лекции по радиационной защите: учебное пособие / В.И. Беспалов. – 2-е изд., расш. и перераб. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – С. 382–401.
2. Гульбин В.Н., Петрунин В.Ф. Исследование радиационнозащитных нанокомпозитов. Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем. Материалы VIII Всероссийской конференции. – М.: Белгород, 2008.
3. Dvilis E. S., Khasanov O. L., Gulbin V. N., Petyukevich M. S., Khasanov A. O., Olevsky E. A. Spark Plasma Sintering of Aluminum-Magnesium-Matrix Composites with Boron Carbide and Tungsten Nano-powder Inclusions: Modeling and Experimentation JOM The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), 2016.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ КАРТИНЫ ПОЛЯ БЕТАТРОНА

Затонов И.А.<sup>1</sup>

Научный руководитель: Штейн М.М., доцент, к.т.н.

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: ivan.zatonov@yandex.ru

#### INVESTIGATION OF THE BETATRON'S HEAT PATTERN FIELD

Zatonov I.A.<sup>1</sup>

Scientific Supervisor: Associate Prof., PhD, Shtein M.M.

<sup>1</sup>Tomsk Polytechnic University

Russia, Tomsk, Lenin ave., 30, 634050

E-mail: ivan.zatonov@yandex.ru

*Данная работа посвящена возможности использования программ для численного моделирования теплового поля бетатрона. Приведены свойства материалов составных частей бетатрона для проведения расчета теплового поля. Рассмотрен тридцатиминутный этап нагрева электромагнита и обмоток излучателя бетатрона. Определены наиболее перегретые участки конструкции излучателя бетатрона.*

*The paper is devoted to the possibility of using programs for numerical simulation of the betatron thermal field. The properties of the betatron parts' composite materials are given for the calculation of the thermal field. A thirty-minute stage of heating the electromagnet and windings of the betatron emitter is considered. The most overheated sections of the betatron radiator design are determined.*

**Введение.** Аэрокосмическая индустрия играет незаменимую роль для Российской Федерации. Данная отрасль оказывает положительное воздействие на экономический рост, научно-технический прогресс, а также военную безопасность страны. Кроме того, аэрокосмическая деятельность имеет ярко выраженную ориентацию на широкое развитие международных отношений. Исходя из этого, целью стратегии развития космической деятельности является обеспечение мирового уровня российской космонавтики и закрепление лидирующей роли России в области космической деятельности.

Радиационный метод контроля нашел свое широкое применение в аэрокосмической индустрии в связи с высокой доступностью, информативностью, относительно низкой стоимости и другими качествами. Применение бетатронов, как источников ионизирующего излучения в радиационном методе контроля занимает незаменимую роль. По этой причине, обеспечение безотказной работы бетатрона является стратегической целью разработчиков. Одной из актуальных проблем в теории бетатростроения, является наличие тепловых потерь в активных частях бетатрона. Под такими активными элементами понимаются элементы, выполненные из ферромагнитных материалов, которые находятся в магнитном поле и элементы, служащие проводниками электрического тока. Поскольку процесс распространения тепла – самопроизвольный, он оказывает влияние на формирование теплового состояния не только активных элементов, но и окружающих их остальных частей устройства. При этом часть выработанного активными элементами тепла теряется в окружающую среду. Потери тепла приводят к снижению полезной мощности устройства, что требует компенсации расходуемой энергии и увеличения затрат [1].

Таким образом, остро встает вопрос о возможности численного моделирования тепловых полей электрических устройств.

Одним из важнейших требований, которые ставится перед производителями бетатронов, является обеспечение длительной работы ускорительных установок без опасного превышения температуры в любой из точек конструкции электромагнита.

Конструкция электромагнита напрямую влияет на фокусирующие свойства магнитного поля излучателя бетатрона. Производители стремятся добиться высоких показателей ресурсоэффективности, в том числе – уменьшения массо-габаритных характеристик. По этой причине вопросам конструирования электромагнитов бетатронов посвящено множество научных работ. В свою очередь, тепловому расчету излучателя бетатрона уделено мало внимания.

Целью данной работы является определение слабых мест в конструкции электромагнита бетатрона с точки зрения перегрева, а также изучение процесса охлаждения электромагнита.

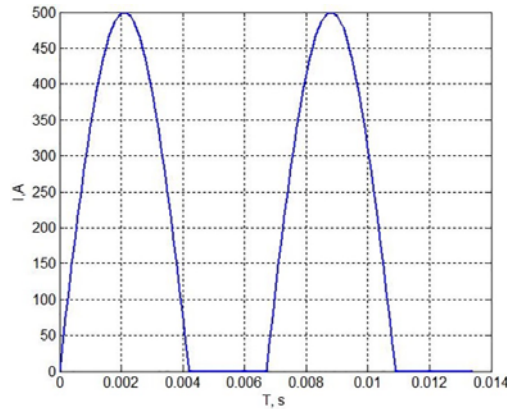
Согласно [2], как правило, тепловые расчеты для электромагнитов проводятся при помощи способов и методов, заимствованных из трансформаторостроения по причине значительных накопленных знаний их расчета.

Процессы нагревания и охлаждения электромагнита бетатрона отличается от аналогичных процессов для трансформатора следующими аспектами:

- Зазор, образуемый формой полюсов, меняет ход тепловых потоков в электромагните. Следует отметить, что именно эта часть электромагнита вместе с боковыми стенками шунтов образуют контур, выделяющий наибольшее количество тепла на единицу объема;

- Полюса и шунты набираются из электротехнической стали, расположенных радиально;
- Однополярный импульсный режим работы, используемый в отличие от работы [2] в большинстве современных типов бетатронов

Форма и величина импульсов тока в обмотках исследуемой модели бетатрона, представлены на рис. 1:



*Рис. 1. Форма и величина импульсов тока в на обмотках бетатрона*

Импульсы на рис. 1 представляют собой синусоидальную полуволну с амплитудой 500 А и полупериодом – 4,2 мс. Частота повтора импульсов – 150 Гц.

Расчет магнитных потерь производится по известным методикам, которые подробно описаны в [3]. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

*Таблица 1. Источники выделения тепла*

Источник	Потери, Вт
Обратный магнитопровод	461.85
Полюса	96.6
Шунты	13.48
Обмотки	475.166

Таким образом, наибольшими потерями обладают обратный магнитопровод и обмотки. Судить о том, какой из элементов будет обладать наивысшей температурой, руководствуясь данными о потерях в стали и меди рано. Необходимо брать в учет объем деталей и условия охлаждения.

Другие пассивные и активные элементы находящиеся внутри корпуса электромагнита также являются источниками теплового излучения, но в данной модели ставится задачи определить картину температурного поля, создаваемую только магнитопроводом и обмотками.

При помощи программ конечно-элементного анализа было проведено численное моделирование тепловой картины поля бетатрона. Для начала необходимо создать трехмерную модель в среде CAD. Создание трехмерной модели бетатрона производилось в среде автоматизированного проектирования «T-flex CAD» (рис. 2).

В ходе моделирования было создано шесть основных моделей, представленных на рис. 1. Поскольку на базе данной модели планировалось проводить анализ, модель была выполнена в масштабе 1:1.



Рис. 2. Электромагнита бетатрона в разобранном виде

Для упрощения модели использовались материалы, встроенные в библиотеку программы, по этой причине дюралюминий, из которого выполнен корпус прибора заменен на алюминий, а молибденовое стекло марки с-49 на керамическое стекло. Данные элементы не являются источниками теплового излучения, по этой причине замена материалов не оказывает значимого воздействия на результат решения.

В табл. 2 приведены свойства материалов, необходимые для решения тепловой задачи в программе.

Таблица 2. Свойства алюминия, используемого в модели

	Удельная теплоемкость $C$ , Дж/(кг*К)	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м*К)	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Показатель адиабаты $\gamma$ , (при $T=20$ °С)
Алюминий	900	238	2700	–
Воздух	1005	0.022	1,2041	1.4
Электротехническая сталь 3408	500	58	7620	–
Стекло	730	1,4	2210	–
Стеклотекстолитовые прокладки	960	0,37	1900	–
Медь	385	400	8960	–

Наиболее распространенные режимы работы бетатрона: «45 минут работы – 15 минут охлаждение», «30 минут работы – 30 минут охлаждение». В данной работе был рассмотрен первый этап 30-минутной нагрузки бетатрона.

Поскольку конструкция бетатрона представляет симметричную деталь, было принято решение проводить расчеты для половины модели, чтобы упростить процесс наложения сетки и ускорить решение задачи.

Согласно температурному распределению можно сказать, что наибольшему нагреву подвергаются галеты и обмоток. Наибольшая зафиксированная температура на тридцатой минуте работы наблюдается в обмотках и составляет 48,6 °С.

При формулировке задачи в программе было задано условие, что отверстия для вентиляторов (рис. 4.1) обладают постоянной температурой, равной 20 °С. Отток тепла производится как через корпус прибора, так и через отверстия в корпусе бетатрона (рис. 4.1).

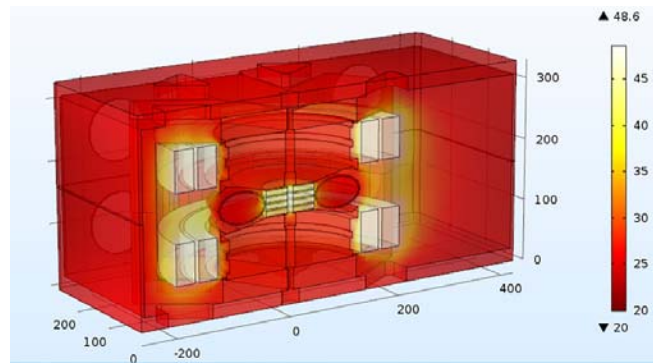


Рис. 3. Распределение температуры при  $t=30$  мин

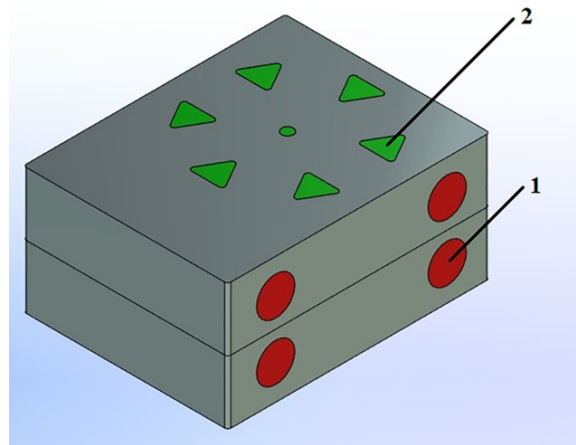


Рис. 4. Поверхности, через которые происходит теплообмен, где 1 – поверхности с постоянной температурой равной температуре окружающей среды; 2 – поверхности оттока тепла

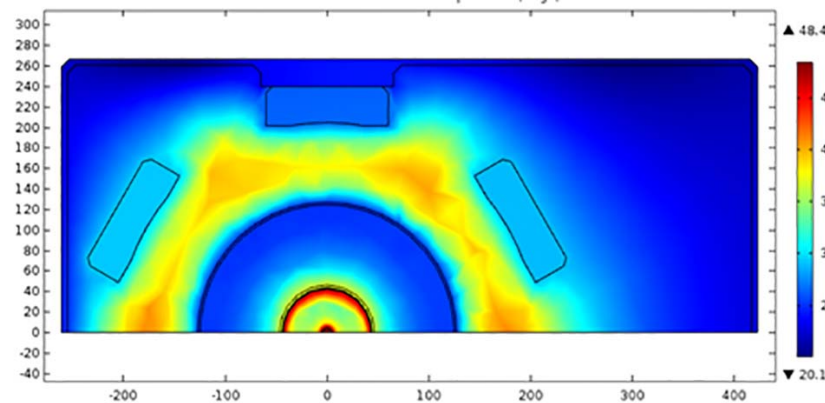


Рис. 5. Температурное распределение в плоскости  $xy$  при  $z=165.0015$

Данная плоскость  $xy$  при  $z=165.015$  является горизонтальной плоскостью симметрии конструкции бетатрона и проходит через стеклотекстолитовую прокладку. Как видно по рисунку прокладки наибольшим образом прогреваются на крайних радиусах.

В ходе моделирования, кроме расчета температурной картины поля, также были получены зависимости изменения температуры со временем. На рис. 8 и 9 представлены вышеупомянутые зависимости для наиболее нагретых элементов конструкции излучателя бетатрона – галетных блоков и обмоток.

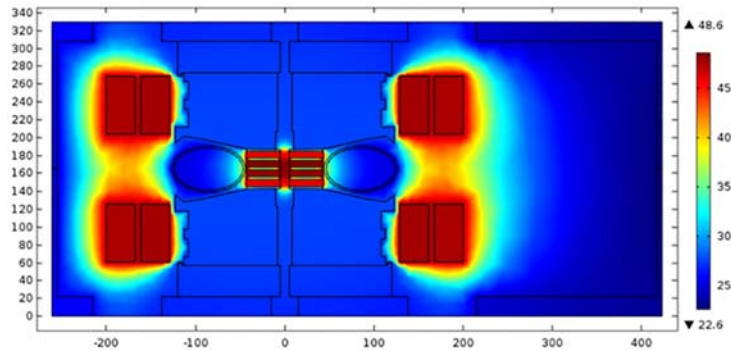


Рис. 6. Температурное распределение в плоскости xz при  $y=0$

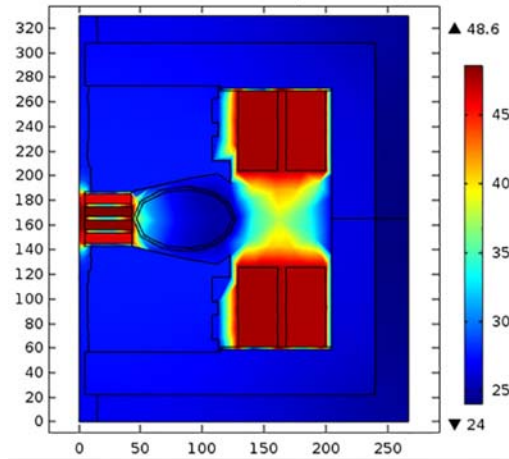


Рис. 7. Температурное распределение в плоскости yz при  $x=0$

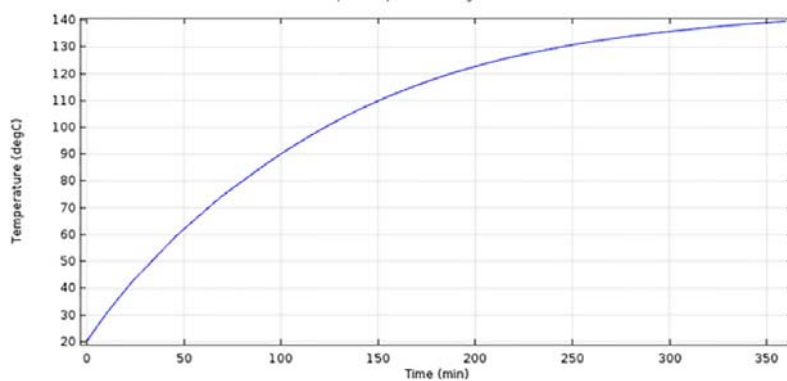


Рис. 8. Процесс нагрева галетных блоков

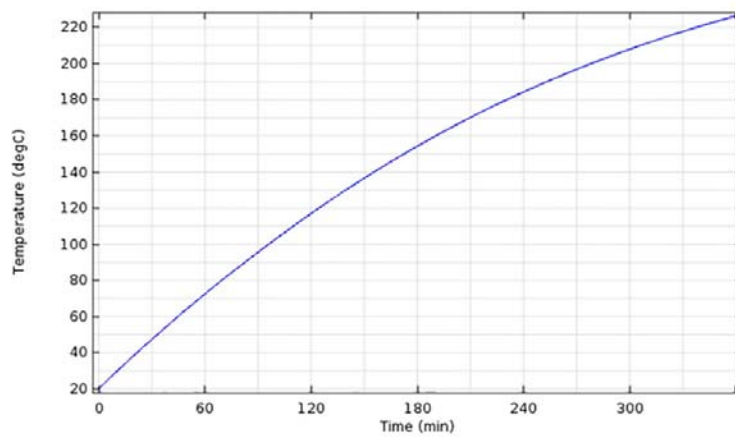


Рис. 9. Процесс нагрева обмоток

Рис. 8 и 9 демонстрируют, что температура в источниках теплового излучения с течением времени изменяется экспоненциально. Данные кривые будут описываться уравнением [1]:

$$T(t) = a * [1 - \exp(-b * t)],$$

где  $T(t)$  – температура во время этапа нагрева;  $a, b$  – коэффициенты аппроксимации;  $t$  – момент времени.

**Заключение.** Реальная конструкция бетатрона обладает гораздо большей величиной тепловых потерь. Вероятная причина несоответствия реальной температуре к экспериментально рассчитанной – ошибка при определении коэффициентов Маренина–Штейнмеца, которые определяются по кривой зависимости потерь от индукции в электромагните. Для устранения данной ошибки необходимо повторно произвести замеры потерь в стали.

Между тем, модель наглядно демонстрирует наиболее перегретые участки конструкции бетатрона и может быть использована для анализа воздушных потоков, которыми обдуваются источники теплового излучения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Логинов В.С. Нестационарные температурные режимы и тепловые потери активных элементов с произвольным числом циклов нагрузка-пауза / В.С. Логинов, В.Е. Юхнов; Мин-во образования и науки РФ, Федер. агентство по образованию, Томский политех. ун-т. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. – 153 с.
2. Шипунов И.В. Вопросы теплового расчета электромагнитов бетатронов [Электронный ресурс] / И.В. Шипунов // Известия Томского политехнического института [Известия ТПИ] / Томский политехнический институт (ТПИ). – Изд-во ТПИ, 1957. – Т. 87: Электронные циркулярные ускорители. – [С. 106–119]. – Заглавие с титульного листа. – Электронная версия печатной публикации. – С. 119.
3. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.

#### **ИМИТАТОР ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ ОРИЕНТАЦИИ НАНОСПУТНИКОВ**

Зубенко А.А.<sup>1</sup>

Научный руководитель: Гормаков А.Н., доцент, к.т.н.

<sup>1</sup>Национальный Исследовательский Томский политехнический университет  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: Anna.zubenko0712@gmail.com

#### **THE GEOMAGNETIC FIELD SIMULATOR FOR GROUND-BASED TESTING OF NANOSATELLITE ORIENTATION SYSTEMS**

Zubenko A.A.<sup>1</sup>

Scientific Supervisor: Associate Prof., PhD, Gormakov A.N.

<sup>1</sup>Tomsk Polytechnic University  
Russia, 30 Lenin ave., Tomsk, 634050  
E-mail: Anna.zubenko0712@gmail.com

*В статье приводится обзор существующих отечественных и зарубежных стендов для полунатурного моделирования систем ориентации наноспутников. Проведен их сравнительный анализ по основным техническим характеристикам. Определены общие тенденции в структуре стендов. Приведены результаты проектирования имитатора геомагнитного поля для обеспечения испытания наноспутников размером не превышающих границ сферы диаметром 100 мм.*

*The article provides an overview of existing domestic and foreign stands for semi-realistic modeling of nanosatellite orientation systems. Their comparative analysis on the basic technical characteristics is carried out. The general trends in the structure of the stands are determined. The results of designing a geomagnetic field simulator for providing a test of nanosatellites of a size not exceeding 100 mm diameter spheres are given.*