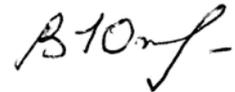


На правах рукописи

Юхнов Вячеслав Евгеньевич



НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМЫ И ТЕПЛОВЫЕ  
ПОТЕРИ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ ЧИСЛОМ  
ЦИКЛОВ «НАГРУЗКА – ПАУЗА»  
(НА ПРИМЕРЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТА МАЛОГАБАРИТНОГО БЕТАТРОНА)

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск 2008

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
доцент Логинов Владимир Степанович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Иванов Владлен Васильевич  
кандидат физико-математических наук,  
доцент Жарова Ирина Константиновна

Ведущая организация: Новосибирский государственный  
технический университет, г. Новосибирск

Защита состоится «25» марта 2008 г. в 14<sup>30</sup> часов в 228 аудитории 10 учебного корпуса на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций ДС 212.025.01 при Томском политехническом университете (634050, г. Томск, пр. Ленина, 30).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «24» февраля 2008 г.

Ученый секретарь  
совета по защите докторских  
и кандидатских диссертаций,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент



О.Ю. Долматов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы.

В настоящее время большую актуальность приобрели вопросы надежности компактных ускорителей электронных частиц – малогабаритные бетатроны различного целевого назначения. Одним из путей решения данной проблемы является анализ и контроль тепловых режимов наиболее нагретого элемента, представляющего собой обмотку или магнитопровод малогабаритного бетатрона, а так же поиск более эффективных методов интенсификации процессов теплообмена.

Большое применение в ускорительной технике нашел метод, в котором интенсификация процессов теплообмена и наибольший эффект снижения тепловых потерь достигается при повторно-кратковременных режимах нагрева и охлаждения активных элементов. Вместе с тем традиционные технологии интенсификации теплообмена обладают рядом недостатков, среди которых следует отметить увеличение наружной поверхности активного элемента, повышение скорости охлаждающей среды над поверхностями активного элемента, выполнение поперечных каналов в обмотке, непосредственное охлаждение обмотки водой.

В связи с этим возникает необходимость в теоретическом обосновании соблюдения температурных и нагрузочных режимов электромагнита (Э) малогабаритного бетатрона, позволяющем обеспечить длительную и надежную работу. Актуальность совершенствования метода определения нестационарных тепловых потерь активных элементов электромагнита малогабаритного бетатрона в неустановившемся тепловом состоянии связана в ряде случаев с экономическими выгодами, заключающимися в уменьшении энергозатрат за счет снижения тепловых потерь.

В настоящем исследовании ставятся и решаются задачи, связанные с проблемой определения допустимого по нагреву теплового режима активных элементов электромагнита при прерывистом нагреве. Теоретические выводы проверяются физическим экспериментом. Эмпирический подбор рациональных значений технологических параметров достаточно трудоёмкий и энергоёмкий процесс. Математическое моделирование может стать основным методом исследования таких процессов и выделения реального диапазона изменения параметров технологического режима (интенсивности и продолжительности токовой нагрузки, длительность бестоковой паузы охлаждения, условий теплообмена между поверхностью активного элемента и охлаждающей средой).

Работа выполнялась в рамках гранта Министерства образования и науки Российской Федерации Федерального агентства по образованию № ГР 01200502212.

Целью работы является создание математических моделей процессов нагрева и охлаждения в обмотке, шихтованном пакете магнитопровода электромагнита и определение с помощью этих моделей технологических параметров, позволяющих увеличить продолжительность работы электромагнита и снизить тепловые потери.

В соответствии с этой целью были поставлены следующие **задачи**:

1. Численное моделирование процесса нестационарной одно- и двумерной теплопроводности, протекающего в поперечном сечении активного элемента электромагнита, при повторно-кратковременных режимах нагрева и охлаждения индукционных ускорителей – малогабаритных бетатронов промышленного назначения.

2. Определение нестационарных тепловых потерь обмотки электромагнита по температурному режиму с произвольным числом циклов «нагрузка-пауза».

3. Проведение анализа результатов численного моделирования температурных режимов намагничивающей обмотки полученных с помощью простых уравнений (приближенное, среднее аналитические решения).

4. Получение решений нестационарной двумерной задачи теплопроводности для прерывистого режима нагрева плоского элемента от внутренних источников теплоты, удобных в практике инженерных расчетов.

5. Оценка погрешности полученных аналитических решений.

Новизна и научная ценность результатов работы:

1. Разработана математическая модель процесса периодического нагрева намагничивающей обмотки электромагнита за счет джоулевого тепловыделения и последующего конвективного охлаждения, позволяющая получить информацию о затратах энергии и длительности тормозного излучения малогабаритного бетатрона.

2. Впервые разработан и обоснован способ расчета нестационарных тепловых потерь в термически массивной намагничивающей обмотке электромагнита.

3. Результаты численного моделирования нестационарных температурных режимов и тепловых потерь намагничивающей обмотки электромагнита с произвольным числом циклов «нагрузка-пауза».

4. Получены простые аналитические решения нестационарной одномерной линейной задачи теплопроводности для прерывистого режима нагрева плоского изотропного элемента от внутренних источников теплоты для определения приближенной и средней температуры по длине активного элемента.

5. Разработана математическая модель процесса периодического нагрева шихтованного пакета магнитопровода электромагнита за счет тепловых потерь от гистерезиса, вихревых токов и последующего конвективного охлаждения, позволяющая получить информацию о затратах энергии и длительности тормозного излучения малогабаритного бетатрона.

6. Результаты численного моделирования нестационарных температурных режимов в шихтованном пакете магнитопровода с произвольным числом циклов «нагрузка-пауза».

7. Впервые проведен анализ влияния изменения алгоритма решения нестационарной двумерной задачи теплопроводности в шихтованном пакете магнитопровода на точность результатов аналитического решения.

8. Впервые получены уравнения связи между внутренними источниками теплоты и нестационарным температурным полем активного элемента.

Практическая значимость. Создан вычислительный комплекс для моделирования нестационарного температурного режима в прямоугольном активном элементе электромагнита с произвольным числом циклов «нагрузка-пауза» при наличии несимметричного конвективного теплообмена на внешних границах. Полученные численные результаты моделирования процесса нестационарной одно- и двумерной теплопроводности, протекающего в поперечном сечении активного элемента электромагнита, при повторно-кратковременных режимах нагрева и охлаждения индукционных ускорителей могут быть использованы для совершенствования методики теплового расчета при проектировании конструкций электромагнита малогабаритных бетатронов, в которых происходит циклический процесс нагревания и охлаждения. Вычислительный комплекс используется в рамках гранта Российского Фонда Фундаментальных Исследований № 08-08-99003-р\_офи.

Достоверность и обоснованность научных положений и результатов подтверждается сходимостью расчетных данных с экспериментальными данными других авторов. При математическом моделировании использованы проверенные надежные методы.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 5, 12-й Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика. Экология, надежность, безопасность», ТПУ, Томск, 1999, 2006; III Семинаре вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике, Барнаул, 2003; XXIV Российской школе по проблемам науки и технологий, посвященной 80-летию со дня рождения академика В.П. Макеева, Государственный ракетный центр «КБ им. академика В.П. Макеева», Межрегиональный совет по науке и технологиям, Миасс, 2004; Международной конференции «Сопряженные задачи механики, информатики и экологии», ТГУ, Томск, 2004; 12-й Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика", МЭИ(ТУ), Москва, 2006; Международной научно-практической конференции «Современные энергетические системы и комплексы и управление ими», ЮРГТУ, Новочеркасск, 2006, 2007; IX, XIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии», ТПУ, Томск, 2003, 2007; 5, 8-й Всероссийской научно-практической конференции «Энергетики и металлургии настоящему и будущему России», МГТУ, Магнитогорск, 2004, 2007.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель нестационарной одномерной теплопроводности в прямоугольном активном элементе с произвольным числом циклов «нагрузка-пауза» при наличии тепловых потерь на внешних границах.

2. Способ расчета нестационарных тепловых потерь в термически массивной намагничивающей обмотке электромагнита.

3. Результаты численного моделирования нестационарного температурного режима в намагничивающей обмотке электромагнита с произвольным числом циклов «нагрузка-пауза» при наличии тепловых потерь на внешних границах.

4. Уравнение приближенного одномерного температурного поля в прямоугольном активном изотропном элементе с произвольным числом циклов «нагрузка-пауза» при наличии тепловых потерь на внешних границах.

5. Уравнение средней температуры в прямоугольном активном изотропном элементе с произвольным числом циклов «нагрузка-пауза» при наличии тепловых потерь на внешних границах.

6. Результаты численного моделирования нестационарного двумерного температурного поля в прямоугольном активном анизотропном элементе с произвольным числом циклов «нагрузка-пауза».

7. Результаты изменения алгоритма решения нестационарной двумерной задачи теплопроводности для произвольного цикла нагрева плоского анизотропного элемента от внутренних источников теплоты.

8. Аналитические решения, устанавливающие связь между функциями распределения удельных потерь и нестационарным температурным полем активного элемента.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и формулировке задач исследований, выборе методов решения задач теплопроводности, анализе полученных данных, непосредственном участии в разработке теоретических моделей, проведении исследований и обработке данных численного моделирования, подготовке материалов докладов и публикаций, выводов и заключения по работе.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ: 5 статей, 3 доклада и 6 тезисов на конференциях, 1 учебное пособие, 1 методическое пособие, 1 научный отчет.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов, заключения и списка литературы, включающего 80 наименований. Основной текст изложен на 149 машинописных листах и поясняется 41 рисунком и 55 таблицами.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и содержание решаемых задач, приведены основные результаты, выносимые на защиту, кратко изложено содержание работы.

В первой главе приводится обзор известных работ по исследованию температурных режимов и методам теплового расчета активных частей электротехнических устройств. Значительный вклад в изучение теплового состояния электрических машин внесли Бойков Г.П., Гуревич Э.И., Гурченко А.А., Данько В.Г., Иванов В.В., Мамедшахов М.Э., Морозов Д.Н., Счастливый Г.Г. и другие исследователи. Рассматриваются особенности температурного поля максимально нагруженного активного элемента, которое позволяет в первом приближении судить о тепловом состоянии электромагнита (Э), а одним из путей интенсификации теплообмена, вследствие чего возможны снижения массы и габаритных размеров активного элемента электротехнического устройства может являться применение

прерывистого или повторно-кратковременного температурного режима нагрева-охлаждения. В результате проведенного анализа сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе, применительно к малогабаритным индукционным ускорителям приведена постановка задачи определения максимального значения температуры обмотки трансформатора – бетатрона, изображенного на рис.1, при которой работа ускорителя осуществляется с ограниченным числом повторений нагрева-охлаждения.

Принятые допущения:

1) теплообмен между обмоткой и воздухом, проходящим через охлаждающие каналы, осуществляется по закону Ньютона;

2) температура охлаждающей среды, коэффициенты теплоотдачи и теплофизические характеристики проводников с диэлектрической изоляцией являются постоянными величинами;

3) внутренние источники теплоты в обмотке линейно зависят от температуры и равны нулю в процессе паузы-охлаждения;

4) для каждой нагрузки или паузы принят свой отсчет времени, т.е. в каждом процессе начальный момент времени, число Фурье равны нулю;

5) высота  $h$  значительно превосходит толщину  $2R$  слоя 1 на рис.1;

6) во время работы электромагнита максимальный перегрев не должен превышать допустимой величины для данного класса изоляции обмотки.

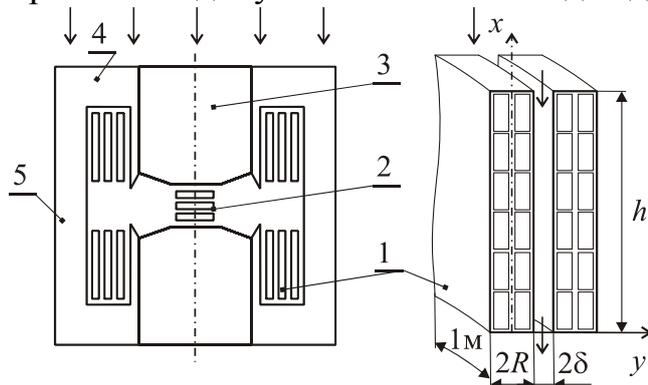


Рис. 1. Схема к тепловому расчету слоя обмотки: 1 – обмотка; 2 – центральные вкладыши; 3 – сердечник; 4 – ярмо; 5 – стойка

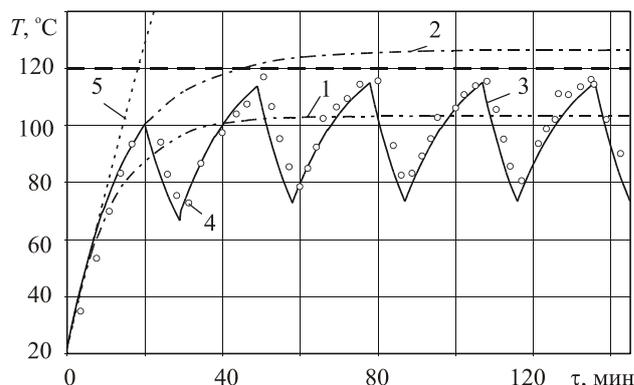


Рис. 2. Изменение во времени максимальной температуры обмотки в точке  $X=0,5$ : 1 –  $Po_1=Po_0=39,384$ ; 2 –  $Po_1=Po_0(1+k\theta_{ж})=41,669$ ; 3 – прерывистая работа электромагнита при  $Po=41,669$ ; 4 – известные в литературе опытные данные; 5 – термически тонкое тело

Математическая постановка нестационарной одномерной с внутренними источниками теплоты линейной задачи теплопроводности имеет вид:

$$\frac{\partial \theta_{н,о}}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta_{н,о}}{\partial X^2} \pm \beta_{н,о}^2 \theta_{н,о} + Po_1(Fo), \quad 0 < X < 1, \quad Fo > 0, \quad (2)$$

$$\text{где } \text{Po}_1(\text{Fo}) = \begin{cases} \text{Po}_1, & 0 < \text{Fo} < \text{Fo}_1; \\ 0, & 0 < \text{Fo} < \text{Fo}_2 \end{cases};$$

начальные условия

$$\theta_{\text{н},1}(X, 0) = \theta_0, \theta_{\text{н},N}(X, 0) = \theta_{\text{о},N-1}(X, \text{Fo}_2), \theta_{\text{о},N}(X, 0) = \theta_{\text{н},N}(X, \text{Fo}_1); \quad (3)$$

граничные условия  $\text{Fo} > 0$ ,

$$\frac{\partial \theta_{\text{н},\text{o}}(0, \text{Fo})}{\partial X} = \text{Bi} \theta_{\text{н},\text{o}}(0, \text{Fo}); \quad \frac{\partial \theta_{\text{н},\text{o}}(1, \text{Fo})}{\partial X} = -\text{Bi} \theta_{\text{н},\text{o}}(1, \text{Fo}). \quad (4)$$

Здесь  $\theta_{\text{н},\text{o}} = (T_{\text{н},\text{o}}(x, \tau) - T_{\text{ж}}) / T_{\text{м}}$ ,  $\theta_{\text{ж}} = (T_{\text{ж}} - T_0) / T_{\text{м}}$  – безразмерные температуры активного элемента и охлаждающей среды;  $\text{Po}_0 = q_{V0} h^2 / (\lambda T_{\text{м}})$  – число Померанцева;  $q_{V0}$  – плотность равномерно распределенных по объему тепловыделений, Вт/м<sup>3</sup>;  $h, R$  – высота, полутолщина слоя, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности слоя, Вт/(м·К);  $\text{Fo} = \lambda \tau / (c_p \rho h^2)$  – число Фурье;  $\tau$  – временная координата, с;  $c_p$  – коэффициент теплоемкости слоя, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность слоя, кг/м<sup>3</sup>;  $\text{Bi} = \alpha h / \lambda$  – число Био;  $\alpha$  – постоянный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $X = x / h$  – безразмерная координата;  $x$  – пространственная координата, м;  $k = \alpha' T_{\text{м}}$  – безразмерный температурный коэффициент активного омического сопротивления;  $T_{\text{м}}$  – масштаб температуры, равный начальной температуре  $T_0$ , К;  $\beta_{\text{н}}^2 = \beta_0^2 - k \text{Po}_0$ ,  $\beta_0^2 = \text{Bi} U h / F$  – безразмерные коэффициенты, учитывающие теплообмен от боковых поверхностей активного элемента;  $U$  – периметр, м,  $F$  – площадь сечения активного элемента, м<sup>2</sup>;  $N$  – номер цикла; индексы „н” – нагрузка, „о” – пауза-охлаждения.

Точное аналитическое решение задачи (2)–(4) полученное методом конечных интегральных преобразований имеет вид:

в процессе тепловой нагрузки  $0 \leq \text{Fo} \leq \text{Fo}_1, N \geq 1$ ,

$$\theta_{\text{н},N}(X, \text{Fo}) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n(X) T_n(\text{Fo}), \quad (5)$$

в процессе паузы-охлаждения  $0 \leq \text{Fo} \leq \text{Fo}_2, N \geq 1$ ,

$$\theta_{\text{о},N}(X, \text{Fo}) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n(X) T_n(\text{Fo}_1) \exp(-\gamma_n^2 \text{Fo}). \quad (6)$$

Здесь  $A_n(X) = \frac{2[\mu_n \sin \mu_n + \text{Bi}(1 - \cos \mu_n)] K(\mu_n, X)}{\mu_n [\mu_n^2 + \text{Bi}^2 + (\mu_n^2 - \text{Bi}^2)] \frac{\sin 2\mu_n + \text{Bi}(1 - \cos 2\mu_n)}{2\mu_n}}$  – это начальные

тепловые амплитуды,

$$\begin{aligned} T_n(\text{Fo}) &= \frac{\text{Po}_1}{p_n^2} [1 - \exp(-p_n^2 \text{Fo})] + \\ &+ [D_n(\text{Fo}_1, \text{Fo}_2) + \theta_0 M_n(\text{Fo}_1, \text{Fo}_2)] \exp(-p_n^2 \text{Fo}); \\ D_n(\text{Fo}_1, \text{Fo}_2) &= \frac{\text{Po}_1}{p_n^2} [1 - \exp(-p_n^2 \text{Fo}_1)] \left( \frac{1 - M_n(\text{Fo}_1, \text{Fo}_2)}{1 - e_n} \right) \exp(-\gamma_n^2 \text{Fo}_2); \\ M_n(\text{Fo}_1, \text{Fo}_2) &= \exp[-(N-1)(p_n^2 \text{Fo}_1 + \gamma_n^2 \text{Fo}_2)]; \end{aligned}$$

$$e_n = \exp[-(p_n^2 Fo_1 + \gamma_n^2 Fo_2)],$$

где  $p_n^2 = \mu_n^2 + \beta_n^2$ ,  $\gamma_n^2 = \mu_n^2 + \beta_0^2$ ;  $\mu_n$  – находятся из решения уравнения

$$\operatorname{ctg} \mu = (\mu^2 - Bi^2)/(2\mu Bi).$$

Результаты расчета по точному аналитическому решению (5), (6) данной задачи, соответствующие на рис.2 кривой 3, хорошо согласуются с известными опытными данными 4.

Здесь рассмотрен учет и влияние внутренних источников теплоты линейно зависящих от температуры активного элемента на его максимальное значение температуры. Полное количество теплоты, выделяемое внутри тела, согласно закона Джоуля-Ленца равно

$$Q = I^2 R_0 [1 + \alpha'(T - T_0)], \quad (7)$$

где  $\alpha' = 1/(c + T_0)$  – температурный коэффициент сопротивления, 1/К;  $c$  – коэффициент, учитывающий материал обмотки;  $R_0$  – активное сопротивление медного проводника при начальной температуре  $T_0$ , °С, Ом;  $I$  – ток, А;  $Q$  – джоулевы потери, Вт. С учетом зависимости внутренних источников теплоты от температуры тела (7) выражение для модифицированного числа Померанцева примет вид  $Ro_1 = Ro_0(1 + k\theta_{ж})$ .

Установлен характер изменения температуры обмотки при непрерывной работе Э на основе результатов численного расчета, который представлен на рис.2 кривыми 1, 2. В установившемся тепловом режиме не учет зависимости внутренних источников теплоты от температуры привел к заниженному результату на 30 %, что на практике ведет к росту максимальной температуры относительно рассчитанных значений и превышению допустимой величины перегрева. Неучет этой зависимости возможен только на начальной стадии теплового процесса не превышающей 3 минут ( $Fo < 0,02$ ), когда расчет максимальной температуры, представленный кривыми 1–3 на рис.2, мало отличается от температуры для термически тонкого тела, приведенной прямой 5. Здесь, величина расхождения между решениями не превышает 1 %.

Учитывая недостатки, присущие точным аналитическим решениям, получены оценочные зависимости для расчета нестационарных температурных режимов обмотки с произвольным числом циклов «нагрузка-пауза», на основе которых возможно определение тепловых потерь, если обмотка его является самым нагруженным в тепловом отношении элементом.

Принятые здесь допущения аналогичны рассмотренным ранее. Таким образом, задача сводится к отысканию распределения температуры в охлаждаемом стержне конечной длины, внутри которого действует переменный во времени источник теплоты. Полученные уравнения описывают процесс тепловой нагрузки, когда теплообмен между поверхностью и окружающей средой превосходит джоулевы потери, т.е.  $\beta_n^2 > 0$  при  $N \geq 1$ . Также получены решения для случаев, когда составляющая джоулевых потерь за счет полей рассеяния электромагнитного поля, а также изменения сопротивления проводника от температуры превосходит теплообмен между его поверхностью

и окружающей средой, т.е.  $\beta_n^2 < 0$  и „уравновешивается” теплообменом между поверхностью элемента и средой, т.е.  $\beta_n^2 = 0$ . Непрерывная работа Э возможна, если стационарная составляющая меньше допустимой  $\theta_{\text{доп}}$  температуры для данного класса изоляции. В противном случае следует перейти к прерывистой работе с периодом токовой нагрузки  $\tau_1$  и чередованием паузы  $\tau_2$ .

С целью отработки методики моделирования прерывистых режимов Э, был проведен численный расчет обмотки бетатрона типа ПМБ–6 с решетчатым полюсом (РП). Результаты расчета представлены на рис.3 кривой 2 при заданных периодах времени  $Fo_1=0,234$  и  $Fo_2=0,176$ . При сравнительно невысоком тепловыделении и большой продолжительности нагрузки практически через три цикла повторений нагрева и охлаждения наступил квазистационарный периодический тепловой режим, изображенный на рис.3, 4.

При этом максимальная температура к концу нагревания ( $N=4$ ) составила  $93,3\text{ }^\circ\text{C}$ , а в конце охлаждения соответственно  $41\text{ }^\circ\text{C}$ . Известные из литературы опытные значения показали  $T_{н,N=4} = 89,6\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{о,N=4} = 46\text{ }^\circ\text{C}$ , т.е. соответственно расхождение с результатами аналитического расчета составило  $\Delta = -4,1\%$  и  $\Delta = 10,9\%$ .

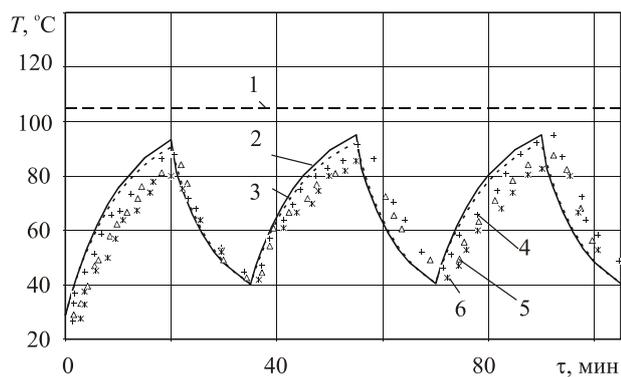


Рис. 3. Изменение во времени температуры обмотки бетатрона типа ПМБ–6 с РП в точке  $X=0,5$ :  
1 – допустимая температура; 2 – приближенное решение (2)-(4); 3 – среднеинтегральное значение решения по (8), (9); 4, 5, 6 – известные в литературе опытные данные

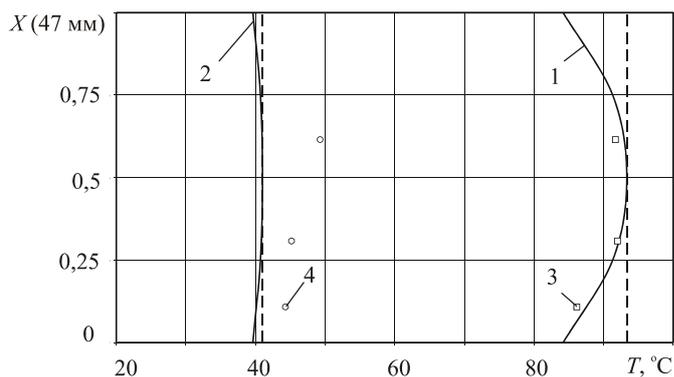


Рис. 4. Распределение температуры по высоте обмотки в конце третьего цикла:  
1 – нагрева; 2 – охлаждения;  
3, 4 – известные в литературе опытные данные

При определении составляющих тепловых потерь активного элемента Э необходимо знание средних температур обмотки бетатрона по ее высоте. Для этого использован классический подход осреднения температур полученных на основе точных аналитических решений.

Нестационарная средняя безразмерная температура по длине стержневого активного элемента электротехнического устройства при прерывистом процессе тепловой нагрузки  $[0, Fo_1]$ ,  $N \geq 1$  описывается уравнением вида:

$$\bar{\theta}_{h,N}(Fo) = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{A}_n T_n(Fo). \quad (8)$$

В процессе паузы–охлаждения  $[0, Fo_2]$ ,  $N \geq 1$ ,

$$\bar{\theta}_{o,N}(Fo) = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{A}_n T_n(Fo_1) \exp(-\gamma_n^2 Fo), \quad (9)$$

Здесь  $\bar{A}_n = \frac{2[\mu_n \sin \mu_n + Bi(1 - \cos \mu_n)]^2}{\mu_n^2[\mu_n^2 + Bi^2 + (\mu_n^2 - Bi^2) \frac{\sin 2\mu_n}{2\mu_n} + Bi(1 - \cos 2\mu_n)]}$  – это средние

значения тепловой амплитуды.

При сопоставлении результатов моделирования температурных режимов обмотки установлено, что наибольшее отклонение между точным аналитическим решением, представленным на рис.2 кривой 3, и решением, полученным для средней температуры (8), (9), отмечено в начале второго цикла нагрева активного элемента, которое не превышает 5%. Правильность предложенного решения для определения средней безразмерной температуры активного элемента подтверждает достаточно точное выполнение закона сохранения энергии. Проверка проведена при значениях  $1 \cdot 10^{-3} \leq Bi \leq 10$ ,  $Ro_1 \leq 42$  или  $q_{Vmax} \leq 5 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>3</sup> и, как видно на рис.5, относительная погрешность  $\varepsilon$  по отношению к максимальному тепловыделению не превышает 0,05%, что соответствует 250 Вт/м<sup>3</sup>.

Известные точные аналитические решения (5), (6) и полученные из них зависимости (8), (9) для средних нестационарных температур для стержневого активного элемента сложны. Поэтому, используя приближенные зависимости, определим средние температуры.

Приближенный расчет нестационарной средней безразмерной температуры по длине стержневого активного элемента электротехнического устройства при прерывистом процессе тепловой нагрузки  $[0, Fo_1]$ ,  $N \geq 1$  и  $\beta_n^2 > 0$  описывается уравнением вида:

$$\bar{\theta}_{h,N}(Fo) = \bar{\theta}_M - \bar{B} T_1(Fo), \quad (10)$$

здесь  $\bar{\theta}_M = \frac{Ro_1}{\beta_n^2} \bar{B}$ , где  $\bar{B}$  – средняя стационарная составляющая температуры;

$$\bar{B} = \int_0^1 B(X) dX = 1 + 2/\beta_n (n_{h,o}^2 - 1) \text{sh}(0,5\beta_n).$$

В процессе паузы–охлаждения  $[0, Fo_2]$ ,  $N \geq 1$ ,

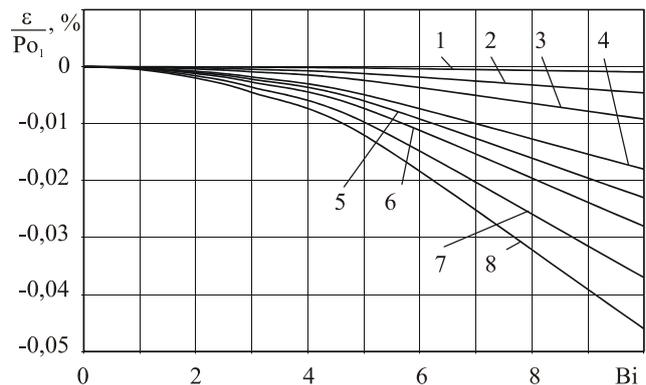


Рис. 5. Изменение отклонения  $\varepsilon$  от закона сохранения энергии при  $Ro_1$ :

1 –  $Ro_1=1$ ; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 20; 5 – 25;  
6 – 30; 7 – 40; 8 – 50

$$\bar{\theta}_{o,N}(Fo) = \bar{B}_n T_1(Fo_1) \exp\left(-\frac{\beta_o^2}{n_o^2} Fo\right). \quad (11)$$

Погрешность отклонения полученного приближенного решения от закона сохранения энергии оценивается по уравнению

$$\varepsilon(Fo) = \frac{\beta_n^2}{n_n^2} (n_n^2 - \bar{B}) T_1(Fo).$$

Предложенное приближенное решение (10), (11) для определения средней безразмерной температуры активных элементов электротехнических устройств с учетом и без учета зависимости от числа Фурье обоснованно и применимо в интервале входных параметров краевой задачи  $3 \cdot 10^{-3} \leq Bi \leq 3$ ,  $0 \leq Fo \leq 0,234$ ,  $Ro_1 \leq 19,38$  или  $q_{Vmax} \leq 5,1 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>3</sup>. Здесь, как видно на рис.6, 7, отклонение от выполнения закона сохранения энергии по абсолютной величине не превышает  $\varepsilon_1 \leq 2,7$ , а его погрешность  $E_1$  по отношению к максимальному тепловыделению не превышает 15%.

Погрешность отклонения полученного приближенного решения от закона сохранения энергии оценивается по уравнению

$$\varepsilon(Fo) = \frac{\beta_n^2}{n_n^2} (n_n^2 - \bar{B}) T_1(Fo).$$

Предложенное приближенное решение (10), (11) для определения средней безразмерной температуры активных элементов электротехнических устройств с учетом и без учета зависимости от числа Фурье обоснованно и применимо в интервале входных параметров краевой задачи  $3 \cdot 10^{-3} \leq Bi \leq 3$ ,  $0 \leq Fo \leq 0,234$ ,  $Ro_1 \leq 19,38$  или  $q_{Vmax} \leq 5,1 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>3</sup>. Здесь, как видно на рис.6, 7, отклонение от выполнения закона сохранения энергии по абсолютной величине не превышает  $\varepsilon_1 \leq 2,7$ , а его погрешность  $E_1$  по отношению к максимальному тепловыделению не превышает 15%.

При этом величина отклонения средней температуры слоя обмотки рассчитанной по приближенному решению (10), (11) относительно точного решения (5), (6) достигает 3%.

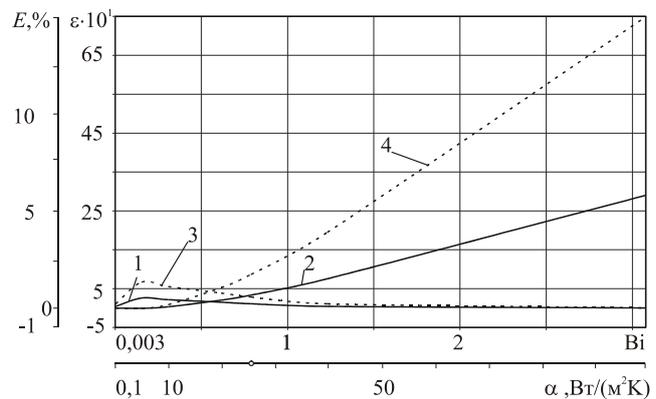


Рис. 6. Изменение абсолютной величины  $\varepsilon$  и ее погрешности  $E$  в зависимости от числа Био в конце цикла нагрузки в квазистационарном прерывистом режиме:  
 1 –  $\varepsilon(Fo)$  – отклонение решения для средней температуры от закона сохранения энергии с учетом зависимости от числа Фурье; 2 –  $\varepsilon_1$  – без учета зависимости от числа Фурье; 3 –  $E(Fo)$  – погрешность отклонения относительно максимального тепловыделения  $Ro_1$  с учетом в решении зависимости от числа Фурье; 4 –  $E_1$  – без учета в решении зависимости от числа Фурье

Анализ результатов численного моделирования тепловых режимов активных элементов показал на возможные различные сочетания бестоковой паузы и температуры в конце охлаждения. Вследствие этого будут наблюдаться различные расходы электроэнергии на проведение повторно-кратковременного режима. Используя полученные точные аналитические решения для средних температур в стержневом активном элементе, охлаждаемом окружающей средой с постоянной температурой  $T_{ж}$ , определяются средние температуры стержневого активного элемента в течение токовой нагрузки и следующей за ней бестоковой паузы. На основе этих температур рассчитываются тепловые потери в одномерной нестационарной постановке задачи для термически массивного тела. Внутри стержня действуют периодически во времени источники теплоты, линейно зависящие от температуры. Вся теплота, которая выделилась при нестационарном тепловом режиме расходуется на тепловые потери:

$$Q_{н,N}^{qV} = Q_{н,N}^{\alpha 1} + Q_{н,N}^{\alpha 2} + Q_{о,N}^{\alpha 1} + Q_{о,N}^{\alpha 2} + Q_{н,N}^{c,pP} - Q_{о,N}^{c,pP}, \text{ Дж.} \quad (12)$$

Такой режим работы считается оправданным в случае  $\sum_{i=1}^N |Q_{н,i}^{qV} - Q_{н,o,i}| \rightarrow \min$ ,

где  $Q_{н,o,i}$  – теплота, расходуемая на тепловые потери за счет процессов конвективной теплоотдачи и изменения энтальпии активного элемента в  $i$ -ом цикле «нагрузки-паузы». Общее количество этой теплоты за  $N$  циклов «нагрузки-паузы» представлено правой частью уравнения (12).

Результаты расчета тепловых потерь для обмотки приведены в табл.1.

Таблица 1

Составляющие нестационарных тепловых потерь в обмотке малогабаритного серийного бетатрона ПМБ–6И при  $N \leq 5$  циклах процесса токовой нагрузки и бестоковой паузы – охлаждения

Характеристика теплового процесса	1	2	3	4	5	Итого:
Средняя температура в процессе токовой нагрузки $\bar{T}_{н,N}$ , °C	100,5	101,7	101,73	101,75	101,75	–
Средняя температура в процессе бестоковой паузы $\bar{T}_{о,N}$ , °C	51,63	52,8	52,9	52,92	52,92	–
Теплота, выделенная в процессе токовой нагрузки $-Q_{н,N}^{qV}$ , кДж	262,83	240,4	239,5	239,44	239,42	1222

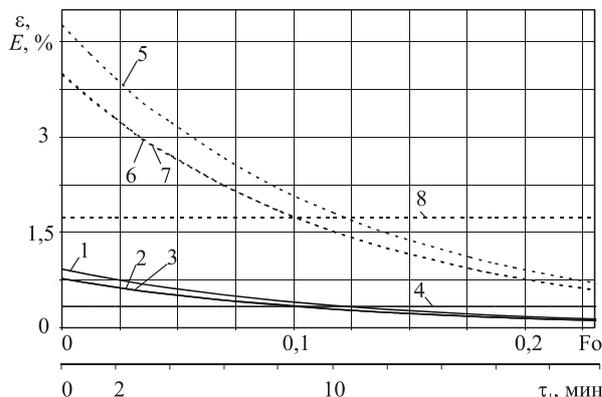


Рис. 7. Изменение абсолютной величины  $\varepsilon(Fo)$ ,  $\varepsilon_1$  и ее погрешности  $E(Fo)$ ,  $E_1$  в различных циклах нагрузки: 1 –  $\varepsilon(Fo)$ ,  $N=1$ ; 2, 3 –  $\varepsilon(Fo)$ ,  $N=2, 3$ ; 4 –  $\varepsilon_1$ ,  $N=1, 2, 3$ ; 5 –  $E(Fo)$ ,  $N=1$ ; 6, 7 –  $E(Fo)$ ,  $N=2, 3$ ; 8 –  $E_1$ ,  $N=1, 2, 3$

Окончание табл.1

Характеристика теплового процесса	1	2	3	4	5	Итого:
Теплота, затраченная на повышение энтальпии обмотки при токовой нагрузке $-Q_{н,N}^{c_{pP}}$ , кДж	140,61	89,45	87,41	87,27	87,23	491,97
Теплота, отведенная конвекцией от боковых поверхностей обмотки при токовой нагрузке $-Q_{н,N}^{\alpha 1}$ , кДж	162,67	165,7	165,78	165,83	165,83	825,81
Теплота, отведенная конвекцией с торцевых поверхностей обмотки при токовой нагрузке $-Q_{н,N}^{\alpha 2}$ , кДж	36,34	37,02	37,04	37,05	37,05	184,49
Теплота, получаемая при снижении энтальпии обмотки в паузе-охлаждения $-Q_{о,N}^{c_{pP}}$ , кДж	87,32	87,36	87,23	87,23	87,23	349,14
Теплота, отведенная конвекцией от боковых поверхностей обмотки в паузе-охлаждения $-Q_{о,N}^{\alpha 1}$ , кДж	17,3	18,47	18,58	18,61	18,61	72,79
Теплота, отведенная конвекцией с торцевых поверхностей обмотки в паузе-охлаждения $-Q_{о,N}^{\alpha 2}$ , кДж	3,83	4,13	4,15	4,16	4,16	16,27

Примечание: „н” – нагрузка, „о” – пауза-охлаждения в цикле  $N$ .

Анализ табл.1 показывает, что уравнение теплового баланса (12) выполняется с погрешностью менее 1,7%.

В третьей главе при рассмотрении нестационарного температурного режима плоского активного элемента электромагнита в двумерной постановке, в качестве объекта исследования был выбран шихтованный пакет магнитопровода. Это связано с существенной анизотропией теплофизических свойств используемых электротехнических материалов, сложными условиями теплообмена, а так же переменным и неравномерным действием внутренних источников теплоты. При этом, основным способом регулирования температурного режима остается интенсификация условий теплообмена частей электротехнических устройств с охлаждающей средой. Поэтому представляет практический интерес работа подобных элементов с произвольным числом циклов «нагрузка-пауза».

Система уравнений в безразмерной форме описывающая процесс нестационарной теплопроводности в активном элементе, имеющем форму бруса при произвольном числе повторов его нагревания и охлаждения, в двумерной постановке задачи имеет вид:

$$\frac{\partial \theta_{н,о}}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta_{н,о}}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta_{н,о}}{\partial Y^2} + \varphi(X, Y)W_3(Fo), \quad (13)$$

$$0 < X < 1, 0 < Y < R, Fo > 0,$$

$$\text{где } W_3(\text{Fo}) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \text{Fo} \leq \text{Fo}_1 \\ 0, & 0 \leq \text{Fo} \leq \text{Fo}_2 \end{cases};$$

начальные условия

$$\begin{aligned} 0 \leq X \leq 1, \quad 0 \leq Y \leq R, \quad \theta_{\text{h},1}(X, Y, 0) = \theta_0, \\ \theta_{\text{h},N}(X, Y, 0) = \theta_{\text{o},N-1}(X, Y, \text{Fo}_2), \quad \theta_{\text{o},N}(X, Y, 0) = \theta_{\text{h},N}(X, Y, \text{Fo}_1). \end{aligned} \quad (14)$$

граничные условия  $\text{Fo} > 0$ ,

$$\begin{aligned} 0 \leq Y \leq R, \quad \frac{\partial \theta_{\text{h},0}(1, Y, \text{Fo})}{\partial X} &= -\text{Bi}_1 \theta_{\text{h},0}(1, Y, \text{Fo}); \\ 0 \leq Y \leq R, \quad \frac{\partial \theta_{\text{h},0}(0, Y, \text{Fo})}{\partial X} &= \text{Bi}_2 \theta_{\text{h},0}(0, Y, \text{Fo}); \\ 0 \leq X \leq 1, \quad \frac{\partial \theta_{\text{h},0}(X, R, \text{Fo})}{\partial Y} &= -\text{Bi}_3 \theta_{\text{h},0}(X, R, \text{Fo}); \\ 0 \leq X \leq 1, \quad \frac{\partial \theta_{\text{h},0}(X, 0, \text{Fo})}{\partial Y} &= \text{Bi}_4 \theta_{\text{h},0}(X, 0, \text{Fo}). \end{aligned} \quad (15)$$

Здесь  $\text{Po}_0 = q_{V0} b^2 / (\lambda_x T_M)$ ;  $\text{Fo} = \lambda_x \tau / (c_p \rho b^2)$ ;  $\text{Bi}_{1,2} = \alpha_{1,2} b / \lambda_x$ ,  $\text{Bi}_{3,4} = \alpha_{3,4} b / (\lambda_x \lambda_y)^{1/2}$ ;  $X = x/b$ ;  $Y = y/b(\lambda_x/\lambda_y)^{1/2}$ ;  $R = H/b(\lambda_x/\lambda_y)^{1/2}$ ;  $W_1(X) = \exp(-NX)$ ,  $W_2(Y) = 1 + MY + DY^2$ ,  $\varphi(X, Y) = \text{Po}_0 W_1(X) W_2(Y)$  – функции, учитывающие неравномерность распределения внутренних источников тепла вдоль осей координат.

Система уравнений (13)–(15) была решена методом конечных интегральных преобразований. Ее решение имеет вид: в процессе тепловой нагрузки  $0 \leq \text{Fo} \leq \text{Fo}_1$ ,  $N \geq 1$ ,

$$\theta_{\text{h},N}(X, Y, \text{Fo}) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{T_N(\mu_n, \gamma_m, \text{Fo}) K_1(\mu_n, X) K_2(\gamma_m, Y)}{K_{11}(\mu_n) K_{22}(\gamma_m)}. \quad (16)$$

Здесь

$$\begin{aligned} T_N(\mu_n, \gamma_m, \text{Fo}) &= \frac{\text{Po}_2}{p_{n,m}^2} [1 - \exp(-p_{n,m}^2 \text{Fo})] + \\ &+ [D_{n,m}(\text{Fo}_1, \text{Fo}_2) + \theta_0 M_{n,m}(\text{Fo}_1, \text{Fo}_2)] \exp(-p_{n,m}^2 \text{Fo}); \\ D_{n,m}(\text{Fo}_1, \text{Fo}_2) &= \frac{\text{Po}_2}{p_{n,m}^2} [1 - \exp(-p_{n,m}^2 \text{Fo}_1)] \left( \frac{1 - M_{n,m}(\text{Fo}_1, \text{Fo}_2)}{1 - e_{n,m}} \right) \exp(-p_{n,m}^2 \text{Fo}_2); \\ M_{n,m}(\text{Fo}_1, \text{Fo}_2) &= \exp\{- (N-1) [p_{n,m}^2 (\text{Fo}_1 + \text{Fo}_2)]\}; \\ e_{n,m} &= \exp[-p_{n,m}^2 (\text{Fo}_1 + \text{Fo}_2)]; \quad p_{n,m}^2 = \mu_n^2 + \gamma_m^2. \end{aligned}$$

в процессе паузы–охлаждения  $0 \leq \text{Fo} \leq \text{Fo}_2$ ,  $N \geq 1$ ,

$$\theta_{\text{o},N}(X, Y, \text{Fo}) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{T_N(\mu_n, \gamma_m, \text{Fo}_1) K_1(\mu_n, X) K_2(\gamma_m, Y)}{K_{11}(\mu_n) K_{22}(\gamma_m)} \exp(-p_{n,m}^2 \text{Fo}).$$

На примере нажимной плиты турбогенератора при  $\text{Bi}_1=0,8$ ,  $\text{Bi}_2=1,6$ ,  $\text{Bi}_3=0,4$ ,  $\text{Bi}_4=1,2$ ,  $\text{Po}_0=112$ ,  $R=7,5$ ,  $\varphi(0,5, Y) = \text{Po}_0(1 - Y^2/R^2)$  получено решение для нестационарного двумерного распределения избыточной температуры в активном элементе электротехнического устройства, имеющем форму бруса,

при пяти повторах его нагревания и охлаждения. Полученное двумерное решение позволяет уменьшить максимальную величину избыточной температуры на 24% в установившемся температурном режиме с произвольным числом циклов «нагрузка-пауза». Как видно из результатов представленных на рис.8, величина наибольшего значения избыточной температуры  $\nu=45^\circ\text{C}$  практически достигает своего установившегося значения через три цикла токовой нагрузки, где  $\vartheta(X, Y, Fo) = \theta(X, Y, Fo)T_M$ ,  $T_M=1\text{ K}$ .

В случаях, когда влиянием теплообмена между нагретыми поверхностями и окружающей средой на температурный режим активного элемента можно пренебречь, оправданным является переход от двумерного к более простому решению для термически тонкого тела.

Математическая постановка задачи в безразмерной форме описывающая процесс нестационарной теплопроводности в плоском активном элементе для термически тонкого тела с произвольным числом циклов «нагрузка-пауза» имеет вид:

$$\frac{d\theta}{dFo} = -Bi\Gamma\theta + Po_0W_3(Fo), \quad Fo > 0, \quad (17)$$

$$\text{где } W_3(Fo) = \begin{cases} 1, & 0 \leq Fo \leq Fo_1; \\ 0, & 0 \leq Fo \leq Fo_2; \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \text{Начальные условия} \quad Fo = 0, \quad \theta_{h,1}(Fo) = \theta_0, \\ \theta_{h,N}(Fo) = \theta_{o,N-1}(Fo_2), \quad \theta_{o,N}(Fo) = \theta_{h,N}(Fo_1). \end{aligned} \quad (18)$$

Решение системы уравнений (17), (18) имеет вид: в процессе тепловой нагрузки  $0 \leq Fo \leq Fo_1$ ,  $N \geq 1$ ,

$$\begin{aligned} \theta_{h,N}(Fo) = \frac{Po}{Bi\Gamma} [1 - \exp(-Bi\Gamma Fo)] + \\ + [D(Fo_1, Fo_2) + \theta_0 M(Fo_1, Fo_2)] \exp(-Bi\Gamma Fo); \end{aligned} \quad (19)$$

Здесь  $Po = Po_0 W_3(Fo)$ ;  $\Gamma = 1$  – геометрический фактор формы;

$$D(Fo_1, Fo_2) = \frac{Po}{Bi\Gamma} [1 - \exp(-Bi\Gamma Fo_1)] \left( \frac{1 - M(Fo_1, Fo_2)}{1 - e} \right) \exp(-Bi\Gamma Fo_2);$$

$$M(Fo_1, Fo_2) = \exp\{- (N - 1) Bi\Gamma (Fo_1 + Fo_2)\};$$

$$e = \exp[-Bi\Gamma (Fo_1 + Fo_2)];$$

в процессе паузы–охлаждения  $0 \leq Fo \leq Fo_2$ ,  $N \geq 1$ ,

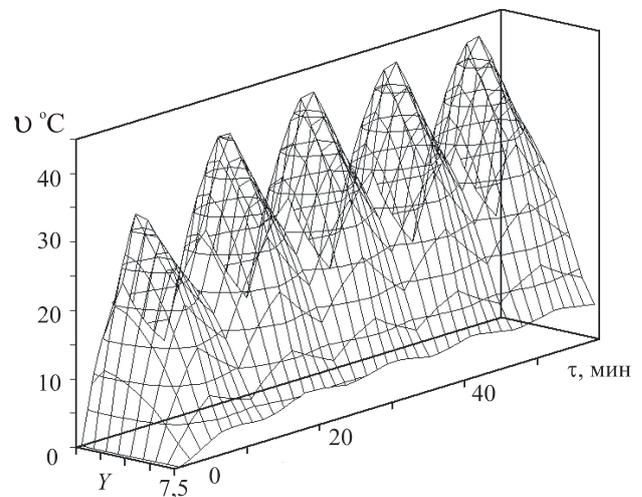


Рис. 8. Изменение во времени избыточной температуры нажимной плиты турбогенератора в сечении  $X=0,5$

$$\theta_{o,N}(Fo) = \left\{ \frac{Po}{Bi\Gamma} [1 - \exp(-Bi\Gamma Fo_1)] + \right. \\ \left. + [D(Fo_1, Fo_2) + \theta_0 M(Fo_1, Fo_2)] \exp(-Bi\Gamma Fo_1) \right\} \exp(-Bi\Gamma Fo). \quad (20)$$

На рис.9 приведены результаты численного расчета нестационарной температуры плоского активного элемента электротехнического устройства при произвольном числе циклов «нагрузка-пауза» в случаях малой интенсивности процесса теплопроводности по решению задачи (19), (20). На основе зависимости между превышениями температуры в активном элементе, которая впервые была предложена профессором Г.П. Бойковым, а также сформулированной и доказанной теоремы в работах В.С. Логинова далее показаны условия, когда существует связь между внутренними источниками теплоты и

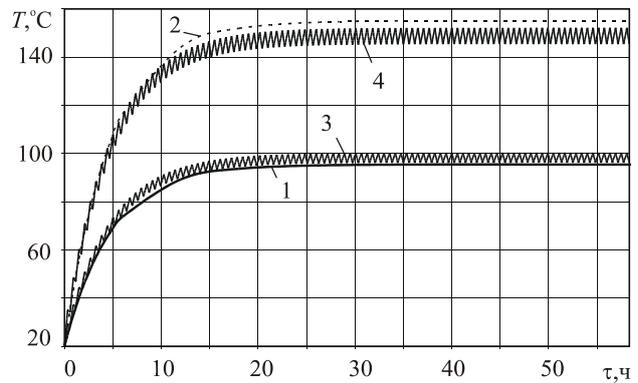


Рис. 9. Изменение во времени температуры термически тонкого шихтованного ядра промышленного бетатрона ПМБ-6: 1, 2 – непрерывный режим нагрева  $q_{v0}=16,5 \cdot 10^3$  и  $30 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>3</sup>,  $N=1$ ; 3, 4 – повторно-кратковременный режим нагрева  $\tau_1=20$  мин,  $\tau_2=9$  мин,  $q_{v0}=30 \cdot 10^3$  и  $50 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>3</sup>,  $N=100$

нестационарным температурным полем в активном элементе. На практике для оценки нестационарного значения температуры при адиабатных условиях теплообмена ( $Bi < 0,001$ ) и малых числа Фурье ( $Fo < 0,001$ ) могут быть использованы уравнения связи. Уравнения, полученные для четырех случаев распределения удельных потерь в электрических машинах, имеют простой вид

$$\theta^I(X, Y, Fo) = \varphi(X, Y) [1 - \exp(-SFo)] / S, \quad (21)$$

$$\theta^{II}(X, Y, Fo) = \varphi(X, Y) (A - GFo/2) Fo,$$

$$\theta^{III}(X, Y, Fo) = \varphi(X, Y) \{ Fo - Fo_0 [1 - \exp(Fo/Fo_0)] \},$$

$$\theta^{IV}(X, Y, Fo) = Po_0 Fo.$$

Например, для нажимной плиты турбогенератора, оценка температуры по уравнению (21) при малом моменте времени  $Fo=0,001$ ,  $Bi=0,001$ ,  $Po_0=112$ ,  $R=7,5$ ,  $S=2$ ,  $\varphi(1, 0)=15,68$ ,  $\varphi(0,5, 0,5R)=51,52$  приводит к максимальному отклонению относительно точного решения (16) при  $N=1$  не превышающему 6,5% в угловой точке ( $X=1, Y=0$ ), а во внутренней прямоугольной области такого отклонения не наблюдается.

Кроме того, оценка температуры активного элемента на начальной стадии теплового процесса при единственном периоде нагрузки ( $N=1$ ) не превышающем  $Fo < 0,02$  возможна по уравнениям (19), (20) не учитывая существующую неравномерность  $W_1(X)=1$ ,  $W_2(Y)=1$  и нестационарность  $W_3(Fo)=1$  внутренних источников тепла. На рис.2 характер протекания этого процесса совпадает с прямой 5, а его продолжительность ограничена 3 мин.

## ВЫВОДЫ. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для одномерного случая разработана математическая модель процесса периодического нагрева намагничивающей обмотки электромагнита за счет джоулевого тепловыделения и последующего конвективного охлаждения, позволяющая получить информацию о затратах энергии и длительности тормозного излучения малогабаритного бетатрона.
2. Проведены расчеты температурных режимов намагничивающей обмотки электромагнита в диапазоне  $1 \cdot 10^{-3} \leq Bi \leq 20$ ,  $1 \cdot 10^{-3} \leq Fo \leq 10$ ,  $1 \leq Po \leq 52$ . Установлено, что знание средних температур по ее высоте необходимо при определении составляющих тепловых потерь активного элемента. Для этого использован классический подход осреднения температур полученных на основе точных аналитических решений. Показано, что погрешность способа расчета нестационарных тепловых потерь в термически массивной намагничивающей обмотке электромагнита не превышает 1,7%.
3. Предложены приближенные уравнения для оценки теплового состояния обмотки электромагнита с произвольным числом повторений нагрева и охлаждения, у которых удельные электрические потери в магнитной цепи значительно меньше, чем в обмотке. Эти расчетные уравнения проверены сравнением с известными опытными данными (расхождение между ними 11%) и могут быть использованы в инженерной практике.
4. В двумерном случае при разработке численных или приближенных методов расчета нестационарных температурных полей в активных элементах наряду с сопоставлением опытных данных по конкретной физической установке наиболее полное представление о погрешности решения дают данные по невязке уравнения энергии. Установлено, что на погрешность аналитического решения нестационарной двумерной линейной задачи теплопроводности с внутренними источниками тепла, записанное в виде суммы слабосходящихся рядов, влияет изменение порядка их суммирования. Погрешность расчета безразмерной нестационарной температуры можно уменьшить на 2,7%.
5. На основе известных теоремы и зависимости между превышениями температуры в прямоугольном активном элементе конечных размеров получено уравнение связи между температурным полем в начальный момент времени и распределением внутренних источников тепла. Уравнение проверено для нажимной плиты турбогенератора при адиабатных условиях теплообмена ( $Bi < 0,001$ ) и малых числах Фурье ( $Fo < 0,001$ ) имеющее максимальное отклонение от точного решения не превышающее 6,5%. Это уравнение может быть использовано для проведения экспресс-анализа величины тепловых потерь в объеме плоского активного элемента при разработке и эксплуатации электромагнитов.

Основные результаты диссертационной работы изложены в публикациях:

1. Юхнов В.Е., Логинов В.С. Нестационарное температурное поле обмотки электрического аппарата // Энергетика. Экология, надежность, безопасность:

- Материалы пятой Всероссийской научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 1999. – С. 94.
2. Юхнов В.Е. О возможности определения величины источников тепла и температуры внутри полого цилиндра по данным на поверхности // Известия ТПУ. – 2003. – №5, Т.306. – С. 56-57.
  3. Юхнов В.Е., Логинов В.С. Расчетная модель для математического описания распределения температуры в обмотке электрического аппарата // Современные техника и технологии: Труды девятой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 7-11 апреля 2003 г. ТПУ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – С. 14-15.
  4. Касьянов В.А., Логинов В.С., Юхнов В.Е. О выполнении связи нестационарных избыточных температур в активном элементе // Труды III семинара вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике. Барнаул, 18 – 20 сентября 2003 г. АлГТУ. . – Барнаул: Изд-во АлГТУ, 2003. – С. 32-36.
  5. Логинов В.С., Юхнов В.Е. Влияние входных параметров на максимальную температуру нажимной плиты турбогенератора // Известия ТПУ. – 2004. – № 4, Т.307. – С. 131-133.
  6. Юхнов В.Е. Исследование нестационарного температурного поля в активном элементе: Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов специальности «Теплофизика». – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 25с.
  7. Логинов В.С., Юхнов В.Е. Уравнения нестационарных температурных полей при индукционном нагреве заготовок прямоугольной формы // XXIV Российская школа по проблемам науки и технологий, посвященная 80-летию со дня рождения академика В.П. Макеева. Тезисы докладов. – Миасс: МСНТ, 2004. – С. 44.
  8. Логинов В.С., Юхнов В.Е. О выполнении связи нестационарных избыточных температур в активном элементе // Ползуновский вестник. – 2004. – № 1. – С. 75-76.
  9. Логинов В.С., Юхнов В.Е. Сравнение методик расчета температуры в начальный период работы нажимной плиты турбогенератора // Энергетики и металлурги настоящему и будущему России: Тезисы докладов 5-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и специалистов 20-21 мая 2004 г. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2004. – С. 8.
  10. Loginov V.S., Yukhnov V.E. “The thermometric method of internal sources definition of heat in active elements of electrotechnical devices”. // Conjugate problems of mechanics computer science and ecology: Proceedings of the International conference. – Tomsk: Pub.Hous of Tomsk State University. 2004. P. 307.
- Логинов В.С., Юхнов В.Е. К обоснованию термометрического метода определения внутренних источников теплоты в активных элементах электротехнических устройств // Сопряженные задачи механики, информатики и экологии: Материалы Международной конференции. – Томск: Изд-во ТГУ, 2004. – С. 148.

11. Логинов В.С., Юхнов В.Е. Практикум по основам теплотехники. // Учебное пособие.– Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 136 с.
12. Обоснование и разработка термометрического метода определения внутренних источников теплоты в активном элементе электромагнита. / Логинов В.С., Юхнов В.Е., Василевский М.В. и др. // Отчет по проекту № 01200502212 Министерства образования и науки Российской Федерации Федерального агентства по образованию по ведомственной научной программе «Развитие научного потенциала высшей школы». – 2005. – 198 с.
13. Юхнов В.Е., Логинов В.С. Диагностика нестационарного температурного поля в полом цилиндрическом активном элементе электромагнита. // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: XII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов – М.: МЭИ, 2006. – Т.3. – С. 64-65.
14. Логинов В.С., Юхнов В.Е. Диагностика нестационарного теплового состояния активного элемента электромагнита при несимметричных условиях охлаждения. // Современные энергетические системы и комплексы и управление ими: Материалы VI Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 21 апр. 2006 г.: В 2 ч., Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2006. – Ч. 1. – С. 42-45.
15. Юхнов В.Е. Оценка нестационарных тепловых потерь от активных элементов электромагнита. // Современные техника и технологии: Труды тринадцатой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 26-30 марта 2007 г. ТПУ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – Т.3. – С. 285-287.
16. Юхнов В.Е. Приближенный расчет температурных режимов обмоток бетатронов с ограниченным числом циклов нагревания и охлаждения // Известия ТПУ. – 2007. – №3, Т.310. – С. 93-94.
17. Логинов В.С., Юхнов В.Е. О законе связи между нестационарными избыточными температурами в активном полом цилиндрическом элементе. // Современные энергетические системы и комплексы и управление ими: Материалы VII Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 20 апр. 2007 г.: В 2 ч., Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2007. – Ч. 2. – С. 17-22.