ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

2000–14 ИФВЭ
ОПЛ ТИСПР

И.А. Звонарев, О.М. Мамаев, А.Д. Рябов, Л.М. Севрюкова

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ СВЧ–СТРУКТУРЕ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЯ SVAAP

Протвино 2000

УДК 621.396.029.6:538.945(075) М-24

Аннотация

Звонарев И.А., Мамаев О.А., Рябов А.Д., Севрюкова Л.М. Анализ тепловых полей в сверхпроводящей СВЧ–структуре для ускорителя SVAAP. Препринт ИФВЭ 2000-14. – Протвино, 2000. 11 с., 4 рис., табл. 5, библиогр. 19

Представлены результаты теоретических расчетов тепловых полей в сверхпроводящей ускоряющей структуре для ускорителя SVAAP (Superconducting Vertical Accelerator for Applied Purposes). Расчеты проведены с учетом теплопроводности ниобия, разработанного ведущими фирмами мира специально для изготовления сверхпроводящих ускоряющих резонаторов.

Первая часть работы посвящена графическому решению уравнения теплового баланса и определены условия устойчивой работы ускоряющей СВЧ–структуры в зависимости от теплопроводности исходного материала для конфигурации ячейки резонатора SVAAP с учетом динамики частиц при определенном уровне вводимой СВЧ–мощности.

Геометрии ячейки резонатора и распределения высокочастотных магнитных полей выполнены с использованием программ URMEL-T, URMEL и PRUD0, тепловые поля определены с использованием программ PRUDO и HEAT2.

Abstract

Zvonarev I.A., Mamaev O.V., Riabov A.D., Sevruykova L.M. Analysis of Thermal Fields in Superconducting RF-Structures for SVAAP. IHEP Preprint 2000-14 . – Protvino, 2000. P.11, figs.: 4, tables: 5, ref.: 19.

The investigation results of thermal fields calculations for the superconducting accelerating cavity have been presented. The thermal conductivity of niobium produced by the leading companies for superconducting accelerating cavities were taken into account.

The first part of the paper conciders a graphic solution of thermal balance equation for different materials and RF power. URMEL-T, URMEL, PRUDO and HEAT2 programs were used in calculations.

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 2000

Введение

Для эффективного использования сверхпроводящих СВЧ–структур в ускорительной технике нужно обеспечить высокие градиенты электрических и магнитных полей. Для этого необходимо решить две проблемы: во-первых, подавить эмиссионные эффекты, и, во-вторых, ликвидировать условия возникновения термомагнитного пробоя.

Согласно современным представлениям, ограничением $B_{кр.вч}$ является термомагнитный пробой, который появляется в СВЧ–структурах из-за негомогенностей в распределении примесей и поверхностных микронеровностей, например, сегрегация легких и тяжелых примесей на границах зерен, дислокациях и другие несовершенства кристаллической решетки сверхпроводящего материала, а также микронеровности снижают критическое ВЧ–поле и приводят к преждевременному пробою при достижении $B_{лок}>B_{кр}$. При этом дефектные участки поверхности сверхпроводника переходят в нормальное состояние, и вся энергия, запасенная в полости резонатора, выделяется на этих участках за время $10^{-5} \div 10^{-6}$ с. Следствием этого явления будет локальный импульсный разогрев поверхности, при котором добротность резонатора падает на два-четыре порядка [1]. По мере остывания дефектные участки на рабочей поверхности возвращаются в сверхпроводящее состояние, и процесс повторяется снова, т.е. термомагнитный пробой вызывает осцилляции добротности, которые иногда сопровождаются звуковыми эффектами. При повышении мощности генератора частота срыва увеличивается.

1. Критические магнитные поля

Для сверхпроводящих резонаторов с хорошей поверхностной обработкой, изготовленных из сверхпроводника II рода, критическое ВЧ–поле совпадает с термодинамическим критическим полем. Для таких резонансных структур характерна следующая температурная зависимость $B_{кр}$:

$$B_{кр} = B_{кр0} \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{T_{кр}} \right)^2 \right], \qquad (1)$$

где $B_{кр0} =$ 0.194 Тл для ниобия [1].

Такая же зависимость $B_{кр}$ получена и для ниобиевых резонаторов [2]. Однако она наблюдается для ниобиевых резонансных структур только при $B_{кр}<0{,}13$ Тл.

При $B_{кр.вч}$ > 0,13 Тл наблюдается более сильная температурная зависимость критического ВЧ-магнитного потока. Авторы работы [3] объясняют это увеличением температуры нормальных областей и связанной с этим более сложной температурной зависимостью поверхностного сопротивления $R_s(T)$.

2. *Уравнение теплового баланса*

В узком температурном интервале от 1,8 до 4,2 К как раз в области рабочей температуры СВЧ–структур ускорителей $R_s(T)$ представляется как [1]

$$R_s(\mathrm{T},\mathrm{B}) = R_{ост} + R_0 \exp\left(-\frac{\Delta}{k\mathrm{T}}\right)\left[1+\gamma_B\left(\frac{B}{B_{kp}}\right)^2\right] , \qquad (2)$$

где $R_0 \exp\left(-\frac{\Delta}{k\mathrm{T}}\right)$ – аппроксимируемая часть поверхностного БКШ сопротивления; γ_B — коэффициент, зависящий от $B_{кр}$.

Зависимость поверхностного сопротивления от магнитного потока учитывается добавочным членом [4] :

$$R_0 \exp\left(-\frac{\Delta}{k\mathrm{T}}\right)\left[\gamma_B\left(\frac{B}{B_{kp}}\right)^2\right] .$$

Локальное поле на поверхности резонатора вызывает нагрев, который повышает температуру внутренней поверхности резонансной структуры. При этом для устойчивой работы ускоряющей системы необходим определенный баланс между нагревом за счет рассеиваемой СВЧ–мощности и отводом тепла в гелиевую ванну. Нагрев за счет рассеиваемой СВЧ–мощности определяется как:

$$Q = \frac{1}{2} R_s H^2 , \qquad (3)$$

$$\mathrm{B} = \mu_0 \mu \mathrm{H} . \qquad (4)$$

Уравнение теплового баланса имеет вид

$$- Q = \frac{\Delta \mathrm{T}}{\frac{d}{\lambda} + R_k} , \qquad (5)$$

где λ – коэффициент теплопроводности сверхпроводящего материала, из которого изготовлена ускоряющая СВЧ–структура.

Разность значений температуры внутренней и наружной стенок структуры будет

$$\Delta \mathrm{T} = \mathrm{T}_s - \mathrm{T}_b , \qquad (6)$$

где T_s – температура внутренней стенки резонатора; T_b – температура внешней стенки.

С учетом Q и B после подстановки ΔT из (6) в уравнение (5) получим уравнение теплового баланса в виде

$$\frac{1}{2\mu_0^2\mu^2} R_s(T,B)B^2 = \frac{\Delta T}{\frac{d}{\lambda} + R_k} \quad , \tag{7}$$

где d – толщина стенок структуры, R_k – сопротивление Капицы. Это уравнение показывает, что на высоком уровне мощности, чем выше поверхностное сопротивление СВЧ–структуры, тем более высокий коэффициент теплопроводности надо обеспечить для отвода тепла, выделяющегося за счет рассеяния СВЧ–энергии при плотности ВЧ–потока B [3].

Условия отвода тепла от внутренней поверхности СВЧ–структуры определяются не только коэффициентом теплопроводности, но и другими теплофизическими характеристиками материала, например, сопротивлением Капицы.

Сопротивление Капицы

Тепловое сопротивление Капицы можно представить как

$$R_k = \frac{\Delta T \cdot S}{P_T} \quad , \tag{8}$$

где S – площадь границы раздела; $P_т$ – скорость изменения теплового потока; ΔT – температурный скачок на границе раздела. Из расчетов, проведенных в [5], видно, что для границы раздела между твердым телом и жидким гелием тепловое сопротивление можно определить по формуле:

$$R_k = \frac{\rho_{TB} \cdot \upsilon^3{}_{ЗВ.ТВ}}{T^3}\left(\frac{15\hbar^3}{2\pi^2 k_b^4 \rho_{He} \upsilon_{ЗВ.He} F_T}\right), \tag{9}$$

где ρ_{He} – плотность гелия 146 кг×м$^{-3}$; $\upsilon_{зв.He}$ – скорость звука в гелии 2,4×10^2 м×с$^{-1}$; F_T=1,5; $\rho_{тв}, \upsilon_{зв.тв}$ – плотность и скорость звука в твердом теле. Подставив численные значения, получим

$$R_k = \left(\frac{4.5\times10^{-19}}{T^3}\right)\cdot \rho_{TB}\upsilon_{ЗВ.ТВ}^3 \quad , \tag{10}$$

где $R_к$ измерено в $\frac{кал \cdot м^2}{Вт}$.

Однако экспериментальные значения $R_к$ не всегда обратно пропорциональны T^3. Как показано в табл. 1, при экспериментальном изучении температурной зависимости $R_к$ получены самые неожиданные результаты [6].

Таблица 1. ***Экспериментальные значения коэффициентов h_0 и N.***

Авторы исследования	**h_0**	**N**
Mittag (1973)	0.0170	3.62
Mittag (1973)	0.020	4.65
Wilkes (1978)	0.0136	3.99
Wilkes (1978)	0.0252	3.90
Wilkes (1978)	0.0072	4.41
Wilkes (1978)	0.0145	3.96
Wilkes (1978)	0.0240	4.30
IPN-GECS (1990)	0.0883	3.25
IPN-GECS (1990)	0.0774	3.44
IPN-GECS (1991)	0.0359	0.0359
$R_k = h_0 \cdot \mathrm{T}^{-n}$		

Графическое решение уравнения теплового баланса

Представим уравнение (7) в виде

$$R_s(T,B) = \frac{2\mu_0^2\mu^2\Delta\mathrm{T}}{(\frac{d}{\lambda} + R_\mathrm{K})\mathrm{B}^2} \quad . \tag{11}$$

Графическое решение уравнения (11) представлено на рис. 1, где

$$\mathrm{F}_1(\mathrm{B}) = \mathrm{R}_s(\mathrm{T},\mathrm{B}) \ ,$$

$$\mathrm{F}_2(\mathrm{B}) = \frac{2\mu_0^2\mu^2\Delta\mathrm{T}}{(\frac{d}{\lambda} + R_\mathrm{K})\mathrm{B}^2} \ .$$

Кривая F_1 – это температурная зависимость поверхностного сопротивления по теории БКШ. Другие характеристики резонансной структуры, такие, как остаточное сопротивление, коэффициент теплопроводности, $R_к$ и толщина стенки входят в параметры кривой F_2. Точки пересечения кривой F_1 с кривой F_2 дают решение уравнения (11) при T = 4.2 К.

Кривые F_2, F_3 и F_6 построены с коэффициентом теплопроводности λ = 10, 40, 80 $\frac{Вт}{м \cdot К}$ соответственно. $B_{теор}$ находится в пределах от 0.08 до 0.115 Тл в зависимости от коэффициента R_0, который является функцией переменных: скорости электронов на поверхности Ферми v_F, электронной плотности N, длины свободного пробега L. Полученные значения соответствуют запасенной энергии $E=0.5 \div 1\times10^{-2}$ Дж. При наличии пересечения кривой F_2 с БКШ–кривой возможна стабильная работа СВЧ–структуры. В этом случае все тепло, выделяемое при рассеянии СВЧ–мощности на внутренней поверхности резонансной полости, отводится в гелиевую ванну.

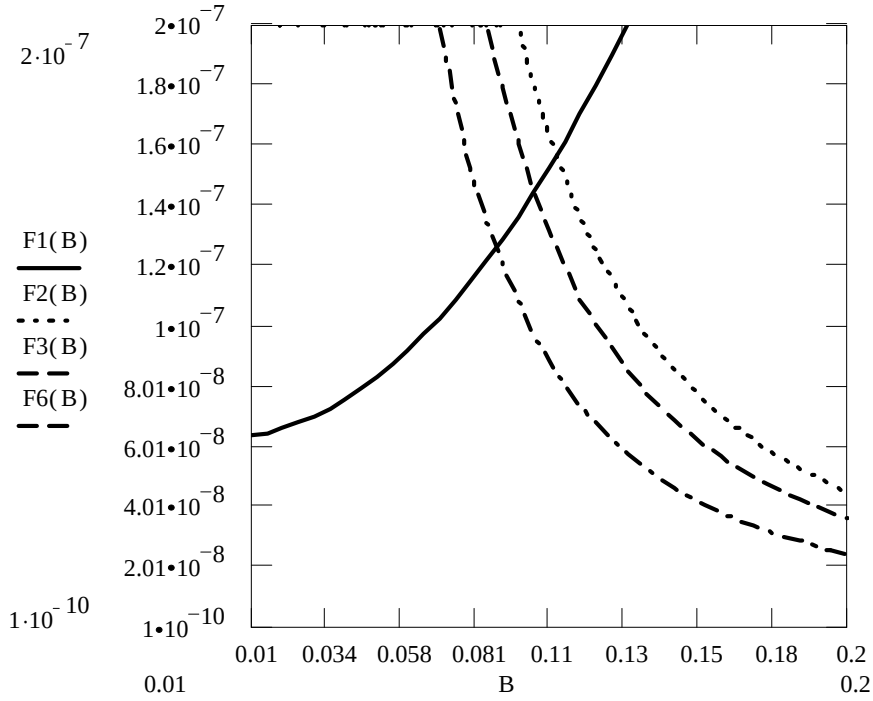

Рис.1. *Графическое решение уравнения теплового баланса.*

При возрастании уровня вводимой СВЧ–мощности наклон линии F_2 уменьшается, и при определенных условиях достигается состояние, когда точка пересечения лежит в пределах $B_{кр}$. В этом случае наблюдается метастабильное состояние системы, и при любых отклонениях температуры стенки возможен тепловой или термомагнитный пробой. Этот критический наклон определяется остаточным сопротивлением сверхпроводника, а также рассмотренными выше теплофизическими характеристиками. Вклад $R_к$ и теплопроводности зависит от материала, из которого изготовлена структура, а также от качества обработки поверхности.

Поверхностная обработка СВЧ–структуры оказывает большое влияние на электрофизические характеристики структуры (пиковые электрические поля, добротность, $R_{ост}$) и на ее теплофизические характеристики (теплопроводность, сопротивление Капицы). Необходима обработка не только рабочей поверхности структуры, но и обработка ее внешней части, что для протяженных структур, как правило, осуществить трудно.

Этим фактом объясняются противоречия между результатами, полученными на отдельных ускоряющих СВЧ–резонаторах и на больших СВЧ–структурах. Ускоряющие поля, достигнутые в протяженных СВЧ–структурах, гораздо ниже, чем лучшие значения пиковых полей для отдельных ускоряющих резонаторов. Дело в том, что $R_к$ пропорционально площади границы раздела между внешней стенкой резонатора или СВЧ–структуры и жидким гелием.

Для снижения вероятности возникновения термомагнитного пробоя в сверхпроводящих СВЧ–структурах необходима надежная технология, которая должна решить следующие задачи: снизить $R_{ост}$, обеспечить высокую гомогенность рабочей поверхности, снизить $R_к$ и увеличить теплопроводность сверхпроводящего материала.

3. Результаты расчета магнитных и тепловых полей с использованием программ PRUD0 и HEAT2

С целью определения зависимостей распределения магнитной напряженности от размеров проведено численное моделирование электродинамических свойств ячеек. Расчеты выполнены в двумерном приближении с помощью комплекса эффективных вычислительных программ на основе метода конечных элементов PRUD0, позволяющих рассчитать с высокой точностью требуемые характеристики [7-9].

Рассматриваемая геометрия ячейки (рис. 2) сверхпроводящего ускоряющего резонатора в настоящее время считается наиболее перспективной. Технология изготовления и технология обработки рабочей поверхности сверхпроводящих резонаторов разработаны в ОПЛ ТИСПР. Расчет геометрических размеров и основных электродинамических параметров СВЧ-структуры ускорителя SVAAP подробно изложен в работе [13].

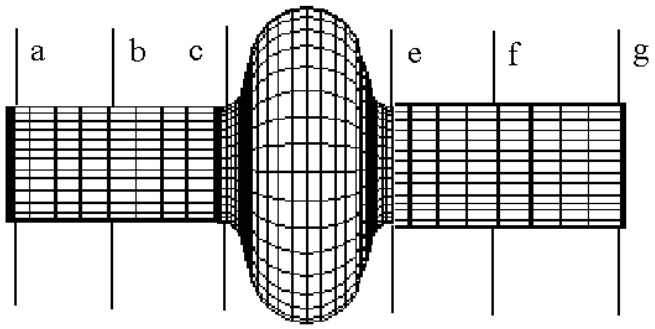

Рис.2. *Геометрия отдельной ячейки сверхпроводящего резонатора для ускорителя SVAAP.*

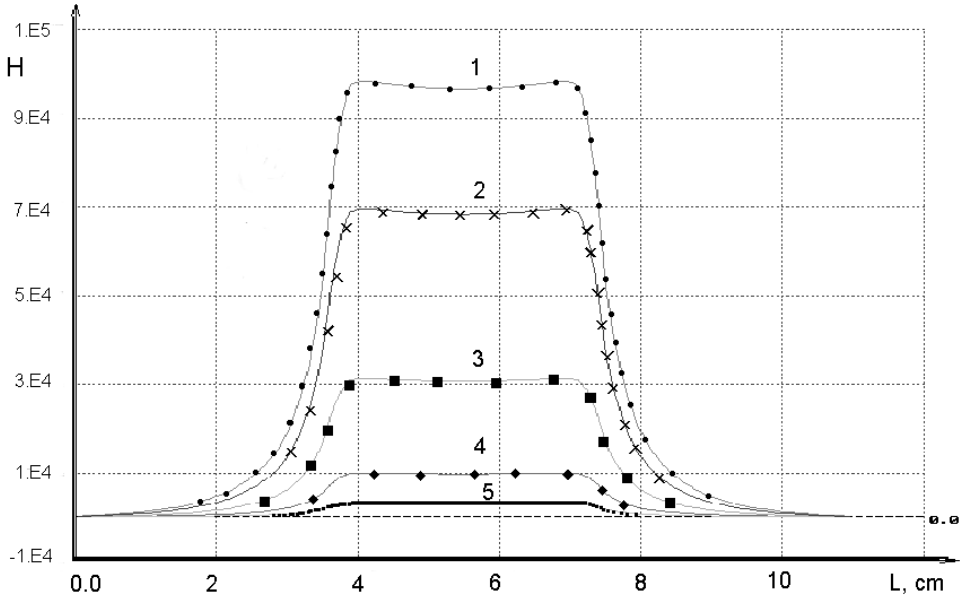

Рис. 3. *График распределения магнитной напряженности (H) по длине резонатора (X) при запасенной энергии W: 1 – 1 Дж., 2 – 0.5 Дж., 3 – 0.1 Дж., 4 – 0.01 Дж., 5 – 0.001 Дж.*

На рис. 3 показано расчетное распределение азимутальной компоненты магнитного поля по поверхности ячейки резонатора при разных уровнях запасенной энергии W (Дж).

С целью определения распределения температуры в зависимости от размеров ячейки проведено численное моделирование термодинамических свойств ячеек. Расчеты осуществлены в двумерном приближении с помощью программы HEAT2 [14] на основе метода конечных элементов, что позволяет рассчитать с высокой точностью требуемые характеристики. Расчеты выполнены для сверхпроводящего ниобия, выпускаемого в России и за рубежом, который имеет разные коэффициенты теплопроводности.

Как уже отмечалось, теплопроводность ниобия зависит от содержания примесей легких и тяжелых элементов, т.е. от чистоты материала. Качество ниобия (его чистота) характеризуется величиной RRR (отношение сопротивления ниобия при температуре 4.2 К к его сопротивлению при 300 К).

В табл.2 показаны основные примеси, теоретически достижимое RRR [15] и теплопроводность в лучших образцах слитков ниобия, который используют при приготовлении листового материала специально для сверхпроводящих ускоряющих резонаторов, произведенного различными фирмами: Государственный завод редких металлов GIREDMET, Wah Chang и HERAEUS [16].

Таблица 2. ***Основные примеси, RRR и теплопроводность ниобия, произведенного ведущими фирмами специально для изготовления сверхпроводящих резонаторов.***

Фирма	Ta, ppm	W, ppm	Mo, ppm	O,N,C, ppm	RRR	λ,Вт/мК при T=4.2 К
ГИРЕДМЕТ	< 30	< 5	< 5	< 20	12000	80
Wah Chang	130			10	6800	40
HERAEUS	310	100	20	20	1400	10

Из табл. 2 видно, что основное влияние на RRR и теплопроводность ниобия оказывает примесь тантала. Известно, что примеси кислорода, азота и углерода влияют на теплопроводность не меньше, чем тантал, но они легко удаляются высокотемпературным отжигом [17]. Следовательно, оставшееся содержание тантала определяет окончательно достигнутую величину теплопроводности.

На рис.4 приведена экспериментальная зависимость теплопроводности лучшего в мире ниобия марки НБР-1, произведенного фирмой ГИРЕДМЕТ специально для сверхпроводящих ускоряющих резонаторов, снятая в процессе проведения комплекса совместных исследований сверхпроводящих резонаторов из ниобия различных фирм при участии Вуппертальского университета (Германия), Интератома (Германия), CEBAF (США), ГИРЕДМЕТ (Москва), Физического института имени П.Н. Лебедева (Москва) и Отраслевой проблемной лаборатории ТИСПР при ИФВЭ (г. Протвино Московской обл.) [16].

Все расчеты проведены для ускоряющего резонатора ускорителя SVAAP с рабочей температурой 4.2 К, резонатор изготовлен из ниобия марки НБР-1, поэтому принята теплопроводность $\lambda = 80\ \frac{Вт}{м \times К}$, как следует из результатов, приведенных на этом рисунке.

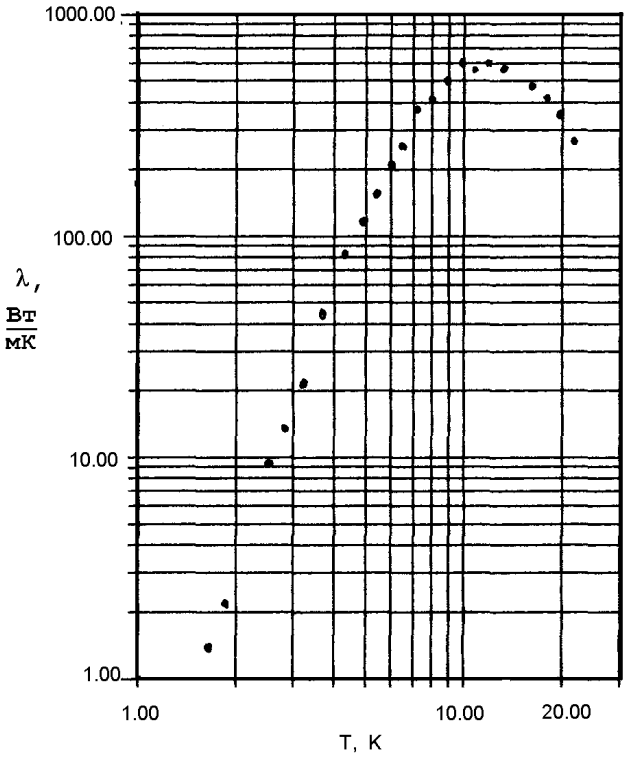

Рис. 4. *Экспериментальная зависиость коэффициента теплопроводности* λ *от температуры T для ниобия марки НБР-1 [18].*

В табл. 3–5 приведены расчетные данные для анализа корреляции магнитных и тепловых полей в местах наиболее высокой напряженности магнитного поля (рис.2) на рабочей поверхности сверхпроводящих резонаторов ускорителя SVAAP [18] в случае использования ниобия различных фирм, указанных в табл. 2.

Таблица 3. ***Расчетные данные для сверхпроводящего ниобия (*** λ ***=10*** $\frac{Вт}{м \times К}$***).***

W, Дж	1	0.5	1×10^{-1}	1×10^{-2}	1×10^{-3}
H, А/м	9.7×10^{4}	6.8×10^{4}	3.1×10^{4}	9.7×10^{3}	3.1×10^{3}
B, Тл	0.146	0.103	0.046	0.015	4.6×10^{-3}
T_1, K	4.4868	4.3434	4.2287	4.2029	4.2003
T_2, K	4.3577	4.2788	4.2158	4.2016	4.2002
ΔT	0.1291	0.0646	0.0129	0.0013	0.0001

T_1 – температура на внутренней границе резонатора, T_2 – температура на внешней границе резонатора, $\Delta T = T_2 - T_1$.

Таблица 4. ***Расчетные данные для сверхпроводящего ниобия (λ =40 $\frac{Вт}{м \times К}$).***

E, Дж	1	0.5	1×10^{-1}	1×10^{-2}	1×10^{-3}
H, А/м	9.7×10^{4}	6.8×10^{4}	3.1×10^{4}	9.7×10^{3}	3.1×10^{3}
B, Тл	0.146	0.103	0.046	0.015	4.6×10^{-3}
T_1, К	4.3850	4.2926	4.2185	4.2019	4.20019
T_2, К	4.3579	4.2790	4.2158	4.2016	4.20016
ΔT	0.0271	0.0136	0.0027	0.0003	0.00003

Таблица 5. ***Расчетные данные для сверхпроводящего ниобия (λ =80 $\frac{Вт}{м \times К}$).***

E, Дж	1	0.5	1×10^{-1}	1×10^{-2}	1×10^{-3}
H, А/м	9.7×10^{4}	6.8×10^{4}	3.1×10^{4}	9.7×10^{3}	3.1×10^{3}
B, Тл	0.146	0.103	0.046	0.015	4.6×10^{-3}
T_1, К	4.3690	4.2845	4.2169	4.20168	4.200168
T_2, К	4.3552	4.2777	4.2156	4.20156	4.200155
ΔT	0.0138	0.0068	0.0013	0.00012	0.000013

Следует отметить, что расчеты проведены для сверхпроводящих резонаторов, изготовленных из ниобия. Расчет тепловых полей и уравнения теплового баланса для сверхпроводящих резонаторов при наличии специального покрытия из Nb_2O_5 [19] и резонаторов на основе сверхпроводящего покрытия, нанесенного на медные оболочки, будет проведен на будущих этапах работы.

На основе анализа графического решения уравнения теплового баланса (рис.1) и результатов, приведенных в табл. 3-5, можно сделать следующие выводы:

1. Высокочастотное магнитное поле на рабочей поверхности сверхпроводящего резонатора в той области резонатора, где наблюдается наибольшая напряженность магнитного поля (рис. 2), минимально для резонаторов, изготовленных из ниобия фирмы ГИРЕДМЕТ с теплопроводностью λ = **80** $\frac{Вт}{м \times К}$ при прочих равных условиях (поверхностная обработка, условия хранения или эксплуатации).
2. На последующем этапе работы необходимо провести анализ устойчивости работы сверхпроводящей ускоряющей СВЧ–структуры для ускорителя SVAAP при разных уровнях вводимой СВЧ–мощности для определения теоретически достижимого ускоряющего поля.
3. В дальнейшем целесообразно определить оптимальную толщину стенок ускоряющего резонатора с точки зрения теплового баланса, стоимости и необходимой механической жесткости.

Список литературы

1. **Диденко А.Н., Севрюкова Л.М., Ятис А.А.** Сверхпроводящие ускоряющие СВЧ–структуры. – М.: Энергоатомиздат, 1981, 208 с.
2. **Kneisel P., Stoltz O., Halbritter J.** – In: Proc. Appl. Supercond Conf., Annapolis, 1972, p.657.
3. **Hillenbrand B., Martens H., Schnitzke K. et al.** – In: Proc. 9-th Int. Conf. High Energy Accel. Stanford, 1974, p. 143.
4. **Севрюкова**. **Л.М.** Перспективы использования сверхпроводящих резонаторов в ускорительной технике. – В сб.: Труды 1 Всесоюзного совещания «Ускорители заряженных частиц и радиационная физика». – М., МИФИ., 1097, т. 3, с. 191–220.
5. **Халатников И.М**. Сопротивление Капицы на границе фаз металл–гелий. // Журнал экспериментальной и теоретической физики, 1952, т.22 с. 687.
6. **Buhler S., Caruette A., Fouaidy M., Junquera T.** Activies on cryostats and SRF cavities at the IPN ORSAY laboratory. – In. Proc of the 6-th Workshop on RF Superconductiviy. – CEBAF, Newport News. USA, v.2, p. 1002–1013.
7. **Абрамов А.Г., Дайковский А.Г. и др.** Пакет программ PRUD–0 для расчета ускоряющих структур. – Препринт ИФВЭ 83–3, Серпухов, 1983.
8. **Абрамов А.Г., Дайковский А.Г., Португалов Ю.И. и др**. Модификация пакета программ PRUD–0 для расчета периодических структур. – Препринт ИФВЭ 83–178, Серпухов, 1983.
9. **Абрамов А.Г., Дайковский А.Г., Португалов Ю.И. , Рябов А.Д.** Вычисление азимутально–однородных собственных электромагнитных полей в осесимметричных периодических структурах произвольной формы. – Препринт ИФВЭ 84–40, Серпухов, 1984.
10. **Efremov V.M., Sevryukova L.M., Hein M., Ponto L.** Improved Method for Electrochemical Polishing of Niobium Superconducting Cavities. – In: Proc. of the 5-th Workshop on RF Superconductivity. – DESY, Hamburg. Germany, 1991, v. 1, p.433-456.
11. **Korotkov A.M., Pesterev S.M., Sevryukova L.M.** Feasibilities of the Methods of Anode Oxipolishing and Anodization in the Technology of Superconducting Cavities. – In: Proc. of the 6-th Workshop on RF Superconductivity. – CABAF, Newport News, USA, v.2, p.800-837.
12 **Севрюкова Л.М., Ефремов В.М.** АС. 1410790, 1985. Способ обработки сверхпроводящего резонатора / ИФВЭ, Протвино. БИ № 46, 1990, с.233.
13. **Komarova V., Sevryukova L., Zvonarev I.** The Superconducting Accelerating Structure Geometry and Beam Dynamics of SVAAP. – In: Proc. of the European Conference on Accelerator Linac. EPAC-98, Stockholm, Sweden, 1998, p. 1342-1344.
14. **Рябов А.Д., Дайковский А.Г. и др.** Пакет программ HEAT-2 для расчета полей температур ускоряющих структур. – Препринт ИФВЭ 83–3, Серпухов, 1983.
15. **Elutin A.V., Kovalyov K.S., Voronenko L.I., Sevryukova L.M., Kurakin V.G., Kurschner H.G., Muller G., Piel H., Reschke D., Sokolov B.A., Klein U., Peiniger M.** Improved High Purity Niobium for Superconducting Accelerator Cavities. – In: Proc. of the 5-th Workshop on RF Superconductivity. – DESY, Hamburg, Germany, 1991, v.1, p. 426-432.
16. **Padamsee H., Knobloch J., Hays T.** RF superconductivity for accelerators. USA, New-York, John Wiley&Sons, 1998, 540 p.

17. **Севрюкова Л.М.** Вопросы технологии сверхпроводящих резонаторов. – В сб.: Сверхпроводящие СВЧ–устройства. – М.: Атомиздат, 1979, № 9, с.45-48.
18. **Звонарев И.А., Рябов А.Д., Севрюкова Л.М.** Расчет геометрических размеров и основных электродинамических параметров СВЧ-структуры для ускорителя SVAAP. – Препринт ИФВЭ 2000-6, Протвино, 2000, 11с.
19. **Matveeva O., Pesterev S., Sevryukova L.** The Influence of Specially Created Oxide Films and RRR on the Emission Properties of Niobium. – In: Proc. of the 8-th Workshop on RF Superconductivity. – Abano Terme (Padya), Italy, 6–8 Oct. 1997. V. 3. Op.673-684.

Рукопись поступила 15 мая 2000 г.

И.А. Звонарев и др.
Анализ тепловых полей в сверхпроводящей СВЧ-структуре для ускорителя SVAAP.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы WORD.
Редактор Н.В. Ежела. Технический редактор Н.В. Орлова.

Подписано к печати 26. 0.5.2000. Формат 60 x 84/8. Офсетная печать.
Печ.л. 1,37. Уч.-изд.л. 1,1. Тираж 120. Заказ 121. Индекс 3649. ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2000–14 И Ф В Э 2000