

## РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА УСКОРЯЮЩИХ И ОТКЛОНЯЮЩИХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР

*М.А. Гусарова, И.В. Исаев, Р.А. Костин, М.В. Лалаян*

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

*E-mail: gusarovamariya@mail.ru*

Приведены результаты расчета распределения температур в ускоряющей структуре с магнитной связью и отрицательной дисперсией, а также в периодической отклоняющей структуре с выточками в стенках ячеек. Тепловой расчет проводился в программе численного моделирования ANSYS. Представлены результаты расчетов для стационарного и переходного теплового режимов. Также представлены результаты расчетов изменения геометрии и резонансной частоты ячеек в зависимости от нагрева структуры. Расчеты проводились для медных структур при учете СВЧ-потерь в стенках, а также различных скоростей охлаждающей жидкости.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

При разработке ускоряющих и отклоняющих структур необходимо учитывать влияние эффектов импульсного высокочастотного нагрева на характеристики структур. Эффекты импульсного нагрева заключаются в изменении характеристик и нарушении стабильной работы структуры из-за её нагрева.

В данной работе исследовалось влияние эффектов импульсного высокочастотного нагрева для ускоряющей структуры с магнитной связью и отрицательной дисперсией и отклоняющей структуры с выточками в стенках ячеек по методике, описанной в работах [1, 2].

Для каждой из структур определены коэффициенты теплоотдачи в зависимости от скорости и температуры воды [3] и проведены тепловые расчеты для определения смещения частоты в зависимости от температуры охлаждающей жидкости. Получены диаграммы распределения полей, температуры, смещений, механических напряжений и деформаций в стационарном режиме. Определены времена нагрева и охлаждения в переходных режимах и получены значения смещения резонансной частоты.

Для исследования работы системы охлаждения структур проведены тепловые расчеты при различных режимах работы.

### 2. УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА

Исследовалась медная периодическая структура на основе круглого диафрагмированного волновода с магнитной связью и отрицательной дисперсией. Данная структура предназначена для использования в компактном линейном ускорителе на гибридной волне [4]. Геометрия структуры рассчитана на частоту 5712 МГц и представляет собой круглый диафрагмированный волновод с щелями связи в диафрагмах и каналами охлаждения в стенках структуры; она представлена на Рис.1.

Мощность питания  $P_0 = 4,28$  МВт; мощность потерь в стенках  $P_s = 1,35$  МВт; коэффициент потерь  $\alpha = 0,77$  (1/м); групповая скорость  $\beta_{гр} = 0,008$ ; вид колебаний  $\Theta = 2\pi/3$ ; добротность  $Q = 9800$ ; коэффициент связи  $K_{св} = 1$  %; отношение радиуса пролётного канала к длине волны равно  $a/\lambda = 0,08$ . Максимальная плотность СВЧ-потерь составляет

18,2 кВт/см<sup>2</sup> при длительности импульса 10 мкс и частоте повторений 240 Гц. Толщина стенок структуры составляет 10 мм, диаметр охлаждающих каналов – 5 мм.

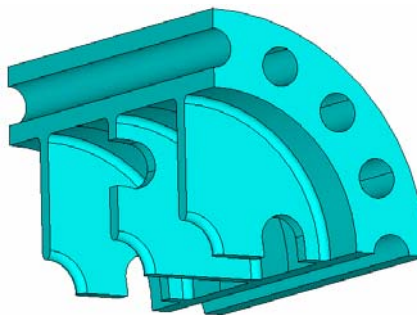


Рис.1. Геометрия ускоряющей структуры

В Табл.1 представлены полученные значения коэффициента теплоотдачи (K) при различных скоростях и температурах охлаждающей жидкости [3].

Таблица 1

T, °C	20	30	40	50
K, Вт/(м <sup>2</sup> ·град) V = 2 м/с	10280	12160	14030	14830
K, Вт/(м <sup>2</sup> ·град) V = 1 м/с	4860	5780	6650	-

#### 2.1. СТАЦИОНАРНЫЙ ПРОЦЕСС НАГРЕВА

Тепловой расчет структуры подразумевает только постоянный процесс нагрева при помощи СВЧ и охлаждения ее водой. В качестве значения мощности в структуре берется средняя по времени мощность.

Исследование смещения частоты в зависимости от температуры охлаждающей жидкости показало, что при температуре жидкости менее 40°C смещение частоты превышает 1 МГц. Для случая с температурой охлаждающей жидкости 40°C приведены диаграммы распределения полей, температуры, смещений, механических напряжений и деформации в стационарном режиме (Рис.2-6). При подобранных параметрах максимальная температура в структуре достигает 70°C, а смещение частоты составляет 0,98 МГц.

Так как щели структуры выполняют функцию связи соседних ячеек по магнитному полю, то наибольший нагрев структуры будет происходить в этой области. Это также видно на полученном распределении температур (см. Рис.3). Также из распределения полей (см. Рис.2) видно, что электрические поля сконцентрированы в крайних двух полуячейках, поэтому нагреваются в основном диафрагмы, разделяющие крайние полуячейки.

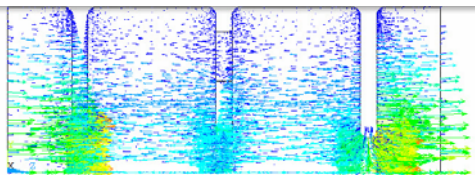


Рис.2. Распределение полей в структуре

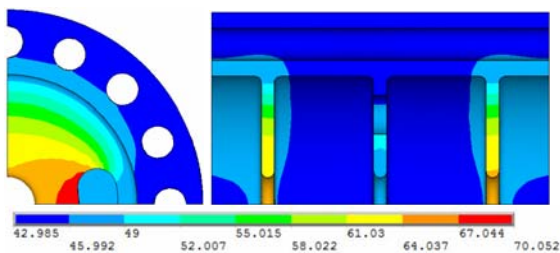


Рис.3. Распределение температуры, °С

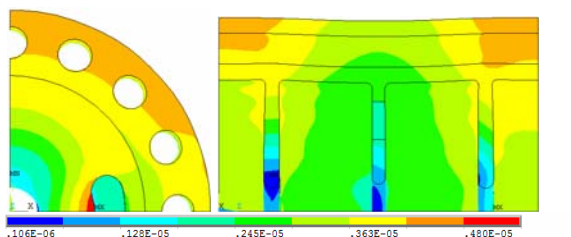


Рис.4. Распределение смещений структуры, м

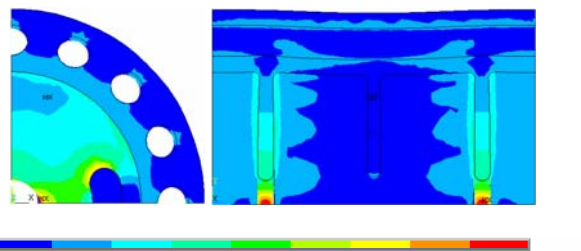


Рис.5. Распределение механических напряжений, Па

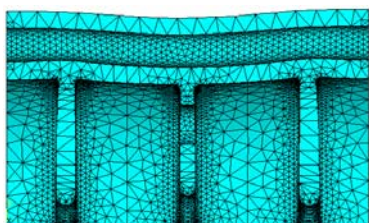


Рис. 6. Деформации структуры от нагрева

## 2.2. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

В качестве переходных процессов нагрева исследовалось влияние импульсного нагрева и охлаждения при включении и выключении средней СВЧ-мощности. Охлаждение и нагрев при включении и выключении СВЧ-мощности имеют экспоненциальный вид с одинаковыми постоянными времени  $\tau = 0,95$  с. Время нагрева/охлаждения  $t = 8$  с.

Также проведены исследования влияния импульсного нагрева непосредственно во время СВЧ-импульса. В отличие от медленного переходного процесса, когда рассматривается включение и выключение СВЧ на длительном интервале времени, для расчета данного процесса была использована не средняя мощность, а импульсная. Расчет проводился для длительности импульса  $T_{\text{и}} = 10$  мкс и частоты повторений  $F_{\text{п}} = 240$  Гц. Постоянная времени для процесса нагрева  $\tau = 6,6$  мкс, а для процесса охлаждения  $\tau = 160$  мкс.

За время импульса  $T_{\text{и}}$  происходит сильный локальный разогрев структуры  $T_{\text{max}} = 78^{\circ}\text{C}$ , но так как этот рост отмечается лишь в небольшой области, то к сильному смещению частоты это не приведет.

В Табл.2 приведены значения смещения резонансной частоты при различных процессах.

Таблица 2

До нагрева СВЧ-мощностью			
$f$ , МГц	5712,0994		
$\Delta f$ , МГц	0		
Во время нагрева СВЧ-мощностью			
	стационарный процесс	перед импульсом	после импульса
$f$ , МГц	5711,1214	5711,1284	5711,1193
$\Delta f$ , МГц	0,978	0,971	0,983

## 2.3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

Для исследования качества работы системы охлаждения проведены тепловые расчеты для различных режимов работы устройства.

Стационарный тепловой расчет для различной входной мощности показал, что зависимость смещения частоты от мощности носит линейный характер с коэффициентом наклона  $0,993 \text{ МГц}/(P/P_0)$ , где  $P_0 = 1,35 \text{ МВт}$ .

Стационарный тепловой расчет для различной температуры охлаждающей жидкости показал, что график зависимости смещения резонансной частоты от температуры охлаждающей жидкости имеет линейный характер с коэффициентом наклона  $0,111 \text{ МГц}/^{\circ}\text{C}$ . При расчете учитывалось изменение коэффициента теплопередачи в зависимости от температуры жидкости, так как вода меняет свои свойства при различной температуре.

По результатам теплового расчета нагрева структуры при различных начальных температурах структуры определено время выхода структуры на стационарный режим в зависимости от начальной температуры структуры для номинальной и половинной мощности питания (Табл.3).

Таблица 3

Температура структуры, °С		30	35	45	50
Время выхода на стационарный процесс, с	для номинальной мощности	10	9	6	7
	для половинной мощности	9,5	8,75	7,5	9,5

### 3. ПОПЕРЕЧНО-ОТКЛОНЯЮЩАЯ СТРУКТУРА

Поперечно-отклоняющая структура (дефлектор) предназначена для измерения поперечного слайс эмиттанта и определения продольного фазового пространства пучков в лазерах на свободных электронах. Структура основана на медном круглом диафрагмированном волноводе, работающем на волне  $E_{11}$  с частотой 3 ГГц и виде колебаний  $\Theta = 2\pi/3$  [5]. Водяные охлаждающие каналы выполнены в виде прямоугольных медных волноводов, которые крепятся к внешним стенкам структуры. Для поляризации волны используется выточка в обечайке, как показано на Рис.7. Частота следования импульсов 10 Гц, длительность импульса 3,1 мкс, мощность питания  $P_0 = 2,5$  МВт, коэффициент потерь  $\alpha = 0,157 \text{ м}^{-1}$ , длина структуры  $L = 0,7$  м, максимальная плотность потерь  $2,44 \text{ кВт/см}^2$ .

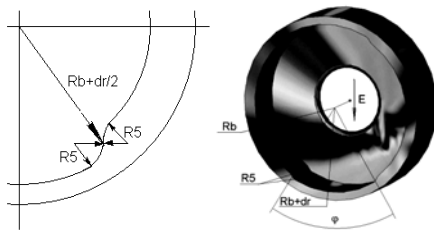


Рис.7. Геометрия структуры

В Табл.4 представлены полученные значения коэффициента теплоотдачи (К) при различной температуре с размерами канала  $16 \times 7,9$  мм и толщиной стенок 2 мм.

Таблица 4

T, °C	35	40	45	50	55
K, Вт/(м <sup>2</sup> ·град) $v=1 \text{ м/с}$	6230	6560	7130	7700	8460

#### 3.1. СТАЦИОНАРНЫЙ ПРОЦЕСС

Для случая с температурой охлаждающей жидкости  $45^\circ\text{C}$ , при которой смещение частоты не превышает 200 кГц, приведены изображения распределения полей, температуры, смещений, механических напряжений и деформации в стационарном режиме (Рис.8-11).

При подобранных параметрах максимальная температура на диафрагмах достигает  $49,156^\circ\text{C}$ , максимальное напряжение составляет 6,1 МПа. Деформации на Рис.11 для наглядности увеличены в 10000 раз.

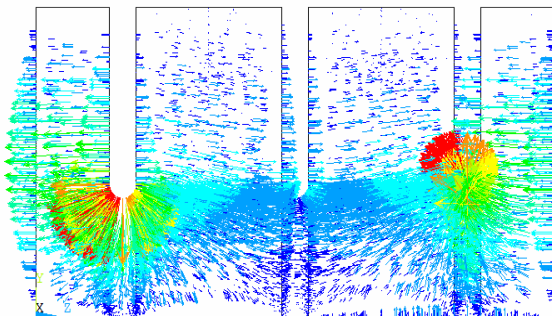


Рис.8. Распределение полей в структуре

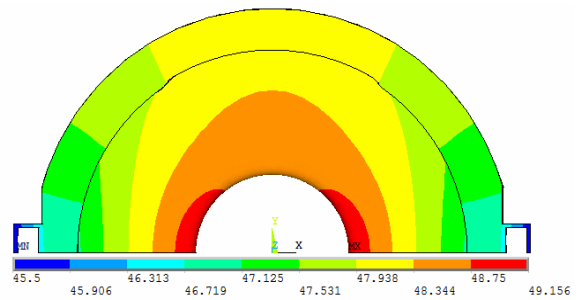


Рис.9. Распределение температуры, °C

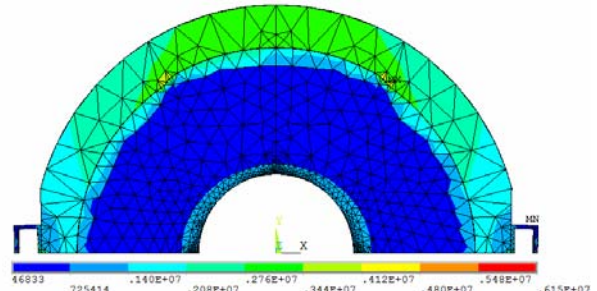


Рис.10. Распределение механических напряжений, Па

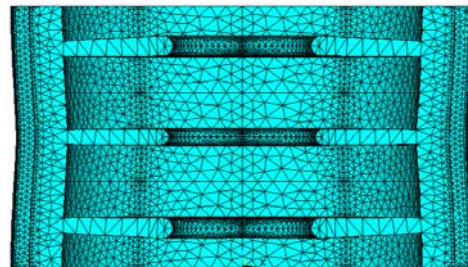


Рис.11. Деформации структуры от нагрева

#### 3.2. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Для исследования переходных процессов рассматривалось влияние импульсного нагрева при включении и выключении средней СВЧ-мощности. Полученные зависимости максимальной температуры в структуре от времени имеют вид, близкий к экспоненциальному, но область с максимальной температурой изменяется со временем. Постоянная времени  $\tau = 70$  с. Время нагрева/охлаждения  $t = 600$  с.

Также проведено исследование влияния импульсного нагрева непосредственно во время СВЧ-импульса. При расчете использовалась импульсная мощность. Результаты расчетов показывают, что за время импульса максимальная температура в структуре повышается примерно на 5,5 градусов, но так как температура повышается в достаточно маленькой области, то и существенных изменений нагрев от единичного импульса не несёт.

В Табл.5 приведены значения смещения резонансной частоты при различных процессах.

Таблица 5

До нагрева СВЧ-мощностью			
f, МГц	2999,583575		
$\Delta f$ , МГц	0		
Во время нагрева СВЧ-мощностью			
	стационарный процесс	перед импульсом	после импульса
f, МГц	2999,4218	2999,4225	2999,4213
$\Delta f$ , МГц	161,779	161,202	162,403



### 3.3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

Для исследования работы системы охлаждения структуры проведены тепловые расчеты для различных режимов работы устройства.

Стационарный тепловой расчет для различной входной мощности показал, что частота в зависимости от мощности в структуре имеет линейную зависимость с коэффициентом наклона равным 172,5714 кГц/(P/P<sub>0</sub>).

Стационарный тепловой расчет для различной температуры охлаждающей жидкости показал, что график зависимости смещения резонансной частоты от температуры охлаждающей жидкости имеет линейный характер с коэффициентом наклона равным 58,66 кГц/°С. При расчете учитывалось изменение коэффициента теплопередачи от температуры жидкости, из-за изменения свойств воды от температуры.

По результатам теплового расчёта нагрева структуры при различных начальных температурах определено время выхода структуры на стационарный процесс в зависимости от начальной температуры структуры для номинальной и половинной мощности питания (Табл.6).

Таблица 6

Т, °С		35	40	50	55
Время выхода на стационарный процесс, с	для номинальной мощности	820	760	980	1080
	для половинной мощности	800	760	800	860

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было проведено численное моделирование нагрева ускоряющей структуры с обрательной дисперсией и поперечной отклоняющей структуры, а также проанализирована работа охлаждающих систем для данных структур.

По результатам тепловых расчетов были найдены необходимые параметры охлаждающих систем для ускоряющей и отклоняющей структур, при которых СВЧ-нагрев структур не вызывает значительного изменения необходимых характеристик.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. D.A. Zavadtsev. Calculation of Thermal Transient Condition in Biperiodic Accelerating Structure // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"* (43). 2004, №2, p.87-89.
2. В. Парамонов, А. Скасырская, К. Floettmann, F. Stephan. Исследование эффектов импульсного ВЧ-нагрева в нормально проводящих резонаторах L-диапазона // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"* (49). 2003, №3, p.51-54.
3. Ф. Крейт, У. Блэк: *Основы теплопередачи* / Пер. с англ. М.: «Мир», 1983, с.512.
4. S.V. Kutsaev, N.P. Sobenin, K.I. Nikolskiy. *Hybrid electron linac based on magnetic coupled accelerating structure*. PAC-2011, N.Y. USA, 2011.
5. А.А. Анисимов, В.И. Каминский, М.В. Лалаян и др. Структура с поперечным отклоняющим полем для лазера на свободных электронах / *Приборы и техника эксперимента*. 2010, №1, с.117-124.

Статья поступила в редакцию 23.09.2011 г.

### THERMAL PROPERTIES OF ACCELERATING AND DEFLECTING STRUCTURES

*M.A. Gusarova, I.V. Isaev, R.A. Kostin, M.V. Lalayan*

The simulation results for temperature maps of different structures are presented and discussed. The negative dispersion accelerating structure with magnetic coupling and the periodic deflecting cavity with recesses in cell walls were analyzed. Model used for simulations consisted of copper cells and liquid cooling system with variable flow. ANSYS code was used for numeric simulation. Static (steady-state) condition and transient regime were studied. Results for geometry and frequency deviation caused by temperature variation are presented.

### РОЗРАХУНОК ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ ПРИСКОРЮЮЧИХ І ВІДХИЛЯЮЧИХ ПЕРІОДИЧНИХ СТРУКТУР

*M.A. Gusarova, I.V. Isaev, R.A. Kostin, M.V. Lalayan*

Наведено результати розрахунку розподілу температур в прискорювальній структурі з магнітним зв'язком та негативною дисперсією, а також в періодичній відхиляючій структурі з виточками в стінках клітинок. Тепловий розрахунок проводився в програмі чисельного моделювання ANSYS. Представлено результати розрахунків для стаціонарного і перехідного теплового режимів. Також представлено результати розрахунків зміни геометрії і резонансної частоти клітинок залежно від нагрівання структури. Розрахунки проводились для мідних структур при обліку СВЧ-втрат в стінках, а також різних швидкостей охолоджуючої рідини.