

# Тепловой расчет ускоряющих структур линейных ускорителей электронов

© М.А. Гусарова, Р.А. Костин, М.В. Лалаян, Е.А. Савин, Н.П. Собенин, Д.Б. Тихонов

Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,  
115409 Москва, Россия  
e-mail: MAGusarova@mephi.ru

(Поступило в Редакцию 3 мая 2012 г.)

Приведены результаты расчета распределения температур в ускоряющих структурах линейных ускорителей электронов, работающих как в режиме стоячей, так и бегущей волн. В первом случае рассмотрен круглый диафрагмированный волновод с магнитной связью, а во втором случае — бипериодическая ускоряющая структура. 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 сверхвысокочастотных потерь в стенках.

## Введение

При разработке ускоряющих 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 ее нагрева. Исследовалось влияние эффектов импульсного высокочастотного нагрева ускоряющей структуры типа круглого диафрагмированного волновода с магнитной связью (КДВМ) [1] и бипериодической ускоряющей структуры (БУС) [2,3]. Для каждой из структур определены коэффициенты теплоотдачи в зависимости от скорости и температуры воды [4] 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.

## 1. Круглый диафрагмированный волновод с магнитной связью

### 1.1. Схема расчета на бегущей волне

Тепловой расчет структуры на бегущую волну выполняется по алгоритму, представленному на рис. 1. Бегущая волна рассматривается в виде двух стоячих волн с разностью фаз  $\pi/2$ . Реализация двух режимов стоячей волны осуществляется при использовании на торцевых стенках резонансного макета граничных условий Неймана (магнитная стенка) и Дирихле (электрическая стенка). Соответствующие картины электрического поля показаны на рис. 2. Они приведены для волны  $E_{11}$

в круглом диафрагмированном волноводе на виде колебаний  $2\pi/3$ .

Параллельно с выборкой магнитных составляющих полей происходит расчет потерь от этих полей в стенках структуры. Применяя масштабирование полей, получается нужная мощность потерь в стенках. Масштабированную мощность потерь нужно разделить на 2, так как далее происходит суммирование полей из двух разных сверхвысокочастотных (СВЧ) расчетов. После суммирования полей для каждого узла по формуле (1) и деления полученной мощности потерь на  $ds$  получаем тепловой поток, который и задаем как граничное условие в каждом узле для теплового расчета. Полная

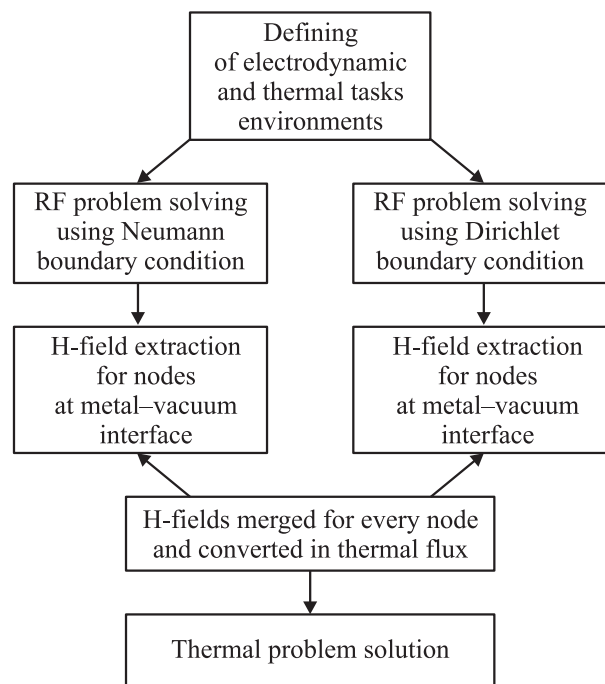


Рис. 1. Схема теплового расчета на бегущей волне.

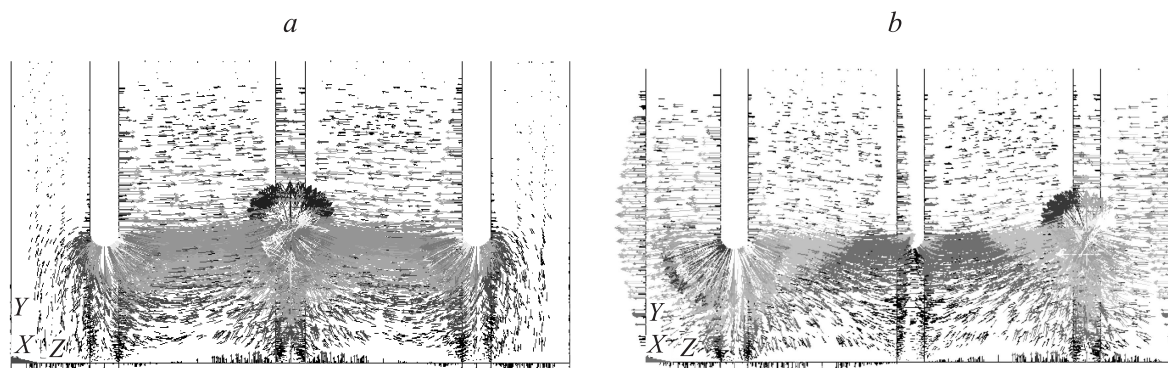


Рис. 2. Стоячая волна E11 с видом колебаний  $2\pi/3$  при разных граничных условиях.

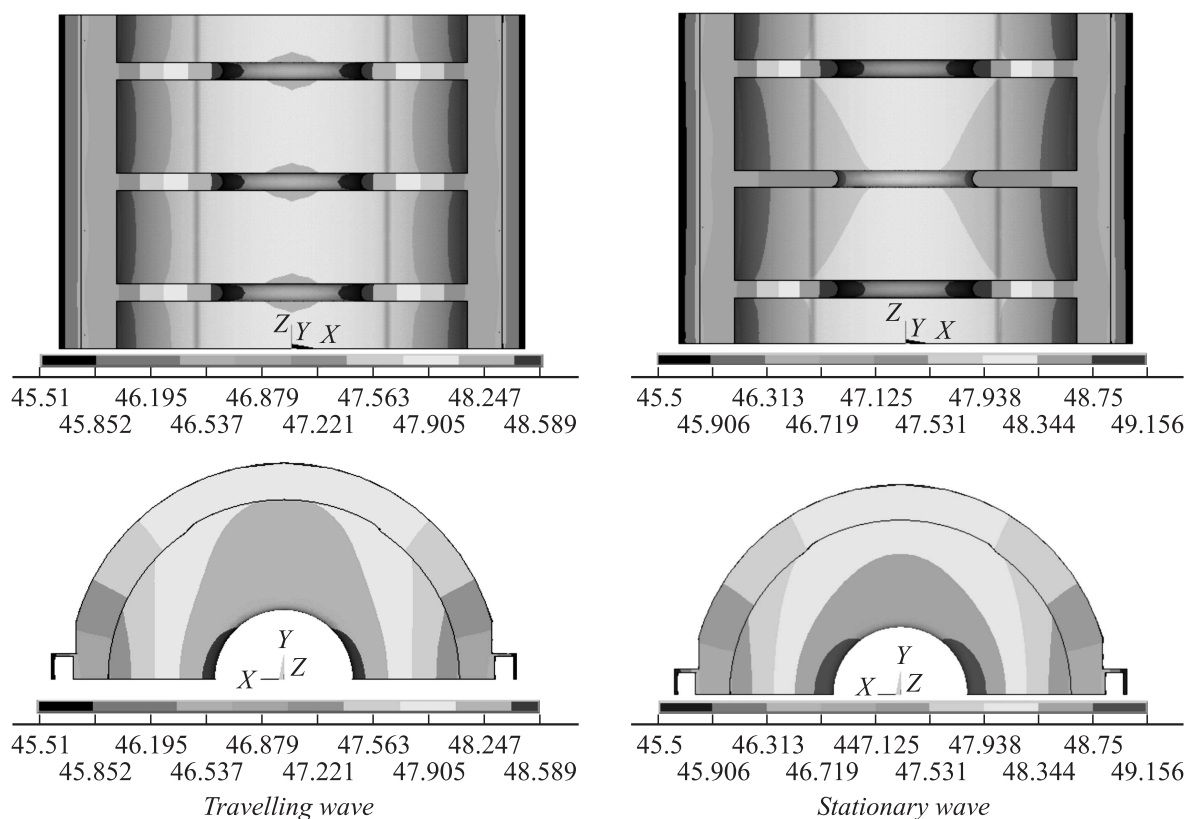


Рис. 3. Распределение температуры в структуре.

мощность потерь

$$P_s = \frac{1}{2} R_s \int H^2 ds, \quad (1)$$

где  $R_s$  — поверхностное сопротивление структуры на резонансной частоте.

На рис. 3 показаны результаты теплового расчета — распределение температуры для бегущей волны и стоячей с условиями электрических стенок на концах. Бегущая волна в отличие от стоячей волны нагревает одинаково все диафрагмы. Однако максимальная температура в структуре на бегущей волне меньше, чем на стоячей.

## 1.2. Параметры структуры

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 [1].

Ускоритель рассчитан на энергию 10 MeV при питании от клистрона мощностью  $P_0 = 4.5$  MW на частоте 5712 MHz, с длительностью СВЧ импульсов  $10 \mu s$  и частотой посылок 240 Hz. Длина ускоряющей части  $l = 48.9$  см, число ячеек 28 (вид колебаний  $2\pi/3$ ). Коэффициент потерь мощности в структуре  $\alpha = 0.66$  1/m, групповая скорость  $\beta_{gr} = 0.008$ , вид коле-

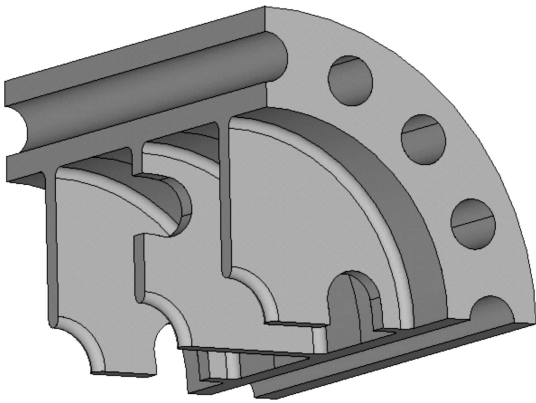


Рис. 4. Геометрия ускоряющей структуры.

Таблица 1. Коэффициент теплоотдачи для различных температур и скоростей течения воды

$T, ^\circ\text{C}$	20	30	40	50
$\alpha, \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}), v = 2 \text{ m/s}$	9500	10500	11600	12500
$\alpha, \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}), v = 1 \text{ m/s}$	5440	6050	6650	7190

баний  $f = 2\pi/3$ , добротность  $Q = 9800$ , коэффициент связи  $k = 5\%$ , отношение радиуса пролетного канала к длине волны равно  $a/\lambda = 0.08$ . Геометрия структуры представляет собой круглый диафрагмированный волновод со щелями связи в диафрагмах и каналами охлаждения в стенках структуры (рис. 4). Диаметр охлаждающих каналов 5 мм.

Потери СВЧ-мощности в стенках структуры рассчитываются по формуле

$$\Delta P = P_0(1 - e^{-2\alpha l}). \quad (2)$$

Подставляя в формулу (2) приведенные выше значения, получаем потери импульсной мощности 2.14 MW, а общие потери средней мощности будут 5140 W, т.е. в расчете на одну ячейку получаются СВЧ-потери 183 W.

В табл. 1 представлены полученные значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ . Этот коэффициент определяется из числа Нуссельта по формуле (3), где  $\lambda$  — теплопроводность воды, а  $D$  — диаметр каналов:

$$\alpha = \frac{\text{Nu}\lambda}{D}. \quad (3)$$

Вычисления проводились по упрощенной формуле для числа Нуссельта:

$$\text{Nu} = 0.023\text{Re}^{0.8}\text{Pr}^{0.4}, \quad (4)$$

где  $\text{Re}$  — число Рейнольдса, а  $\text{Pr}$  — Прандтля. Этот метод дает немного заниженное значение относительно более сложного метода определения этого коэффициента (с корреляцией по диаграмме Мууди–Moody Diagram), использованного в работе [3].

### 1.3. Стационарный процесс нагрева

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

В результате анализа смещения частоты в зависимости от температуры охлаждающей жидкости была выбрана оптимальная температуры воды  $40^\circ\text{C}$ . Для этого случая на рис. 5 приведены результаты механического расчета структуры при нагреве от СВЧ-мощности. При подобранных параметрах максимальная температура в структуре достигает  $56.5^\circ\text{C}$ , а смещение частоты составляет  $0.67 \pm 0.04 \text{ MHz}$ .

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.

### 1.4. Переходные процессы

В качестве переходных процессов нагрева исследовалось влияние импульсного нагрева и охлаждения при включении и выключении СВЧ-мощности. 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. За время импульса  $T_{\text{imp}}$  происходит сильный локальный разогрев структуры до  $T_{\text{max}} = 60.1^\circ\text{C}$ , но так как этот рост отмечается лишь в небольшой области, то к сильному смещению частоты это не приводит. Данные по изменению частоты в динамическом режиме представлены в табл. 2.

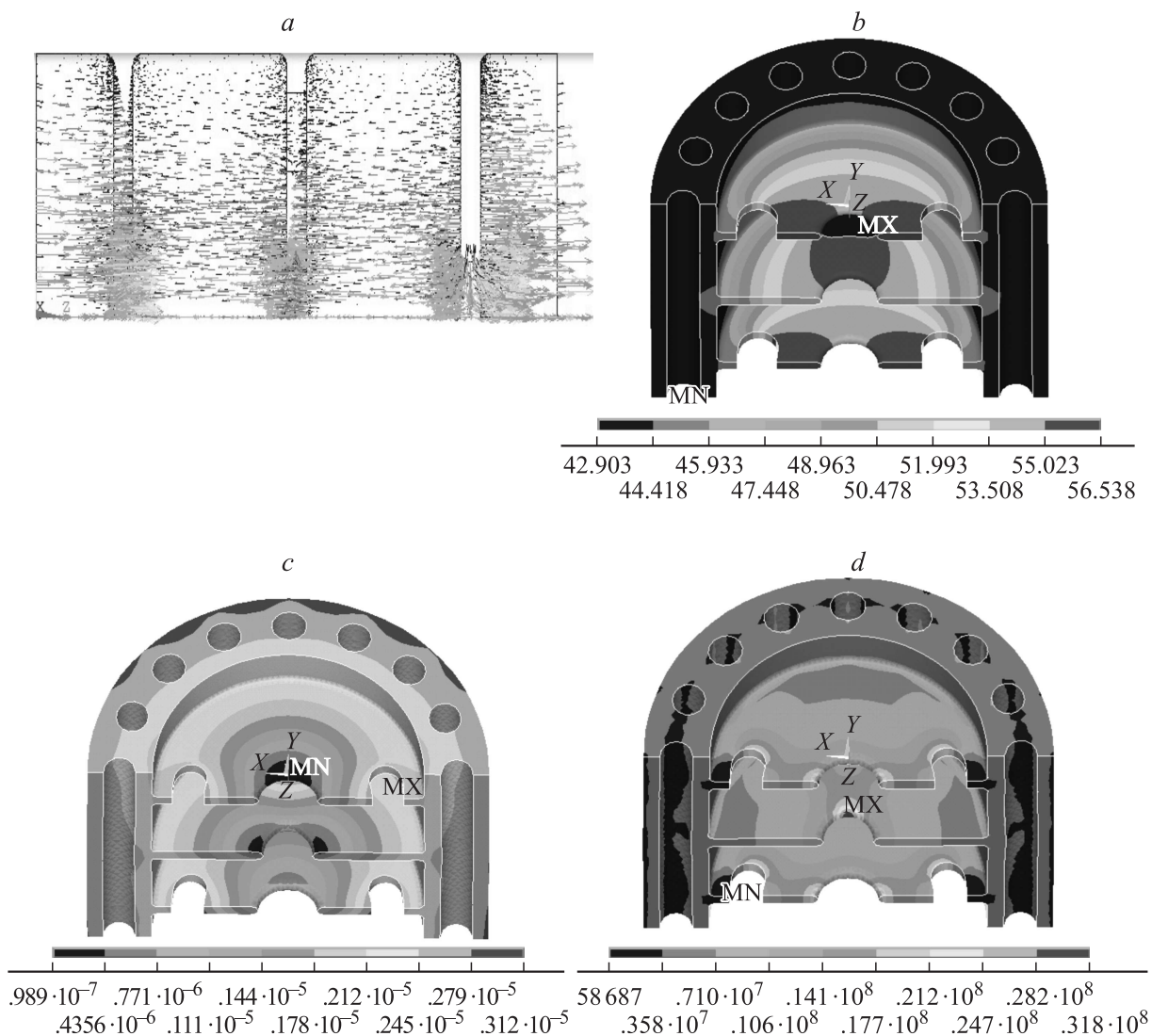
### 1.5. Исследование работы системы охлаждения

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

Таблица 2. Частота и температура на различных этапах импульсного режима\*

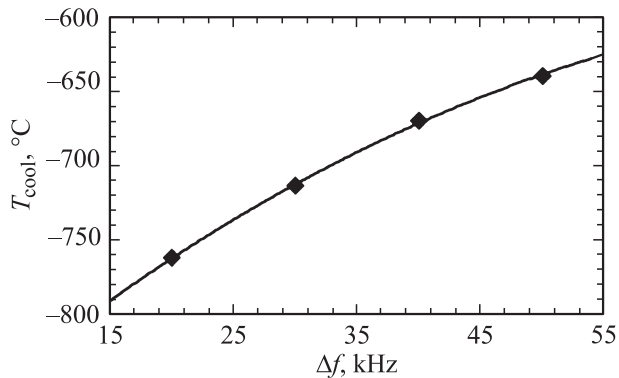
	Усредненный режим	Перед импульсом	После импульса
$\Delta f, \text{kHz}$	-669.7	-667.9	-670.0
$T_{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	56.54	56.43	60.09

Примечание. \* Три значения сдвига частоты представлены для сравнения между собой. Для этого, с учетом того что погрешность имеет систематический характер, они даны с более высокой точностью по сравнению с вышеуказанной.



**Рис. 5.** Распределение в структуре: *a* — полей, *b* — температуры, °С; *c* — смещений, *m*; *d* — механических напряжений, Па. (Картина полей (*a*) получена для стоячей волны при граничных условиях в виде электрических стенок).

Стационарный тепловой расчет для различной входной мощности показал, что зависимость смещения ча-



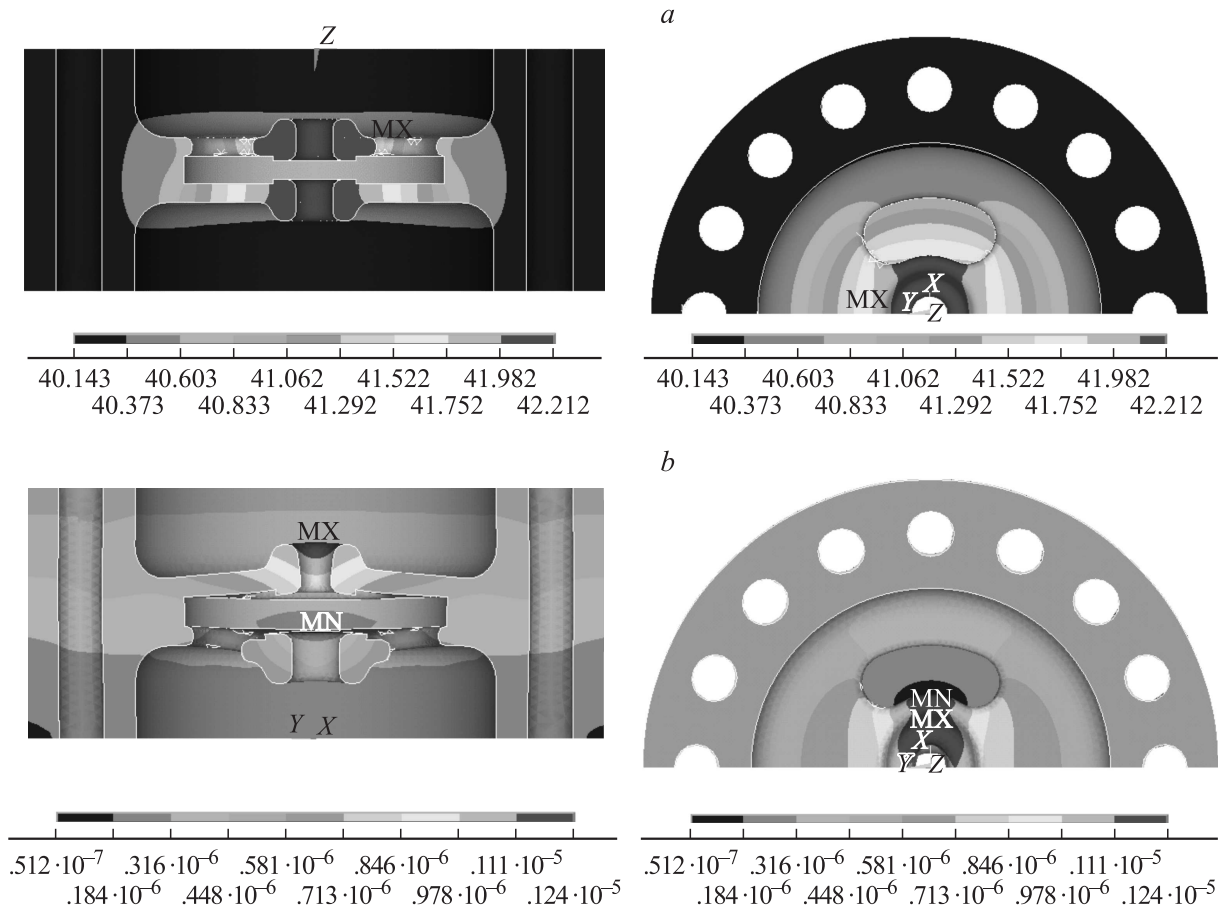
**Рис. 6.** Зависимость смещения частоты от температуры воды.

сты от мощности носит линейный характер с коэффициентом наклона  $K[\text{MHz}] = (-0.69 \pm 0.05)(P/P_0)$ , где  $P_0 = 2.14 \text{ MW}$  — импульсная мощность потерь. График зависимости смещения резонансной частоты от температуры охлаждающей жидкости  $T_{cool}$  (стационарный тепловой режим) представлен на рис. 6. При расчете учитывалось изменение коэффициента теплопередачи от температуры жидкости из-за того, что вода меняет свои свойства при различной температуре (табл. 1).

По результатам теплового расчета нагрева структуры определено время выхода структуры на стационарный режим в зависимости от начальной температуры для номинальной и половинной мощностей питания (табл. 3). Время выхода на стационарный процесс определялось по времени, при котором максимальная температура структуры достигала 90% своего установившегося значения.

**Таблица 3.** Время выхода температуры на значение при средней мощности

Температура структуры, °С		30	40	50
Время выхода на стационарный процесс ( $\pm 0.05$ s)	Для номинальной мощности	3.10	2.90	2.75
	Для половинной мощности	3.20	3.00	2.85

**Рис. 7.** Распределение нагрева в ячейке структуры (а) и ее деформация (увеличенный масштаб) (б).

## 2. Бипериодическая ускоряющая структура

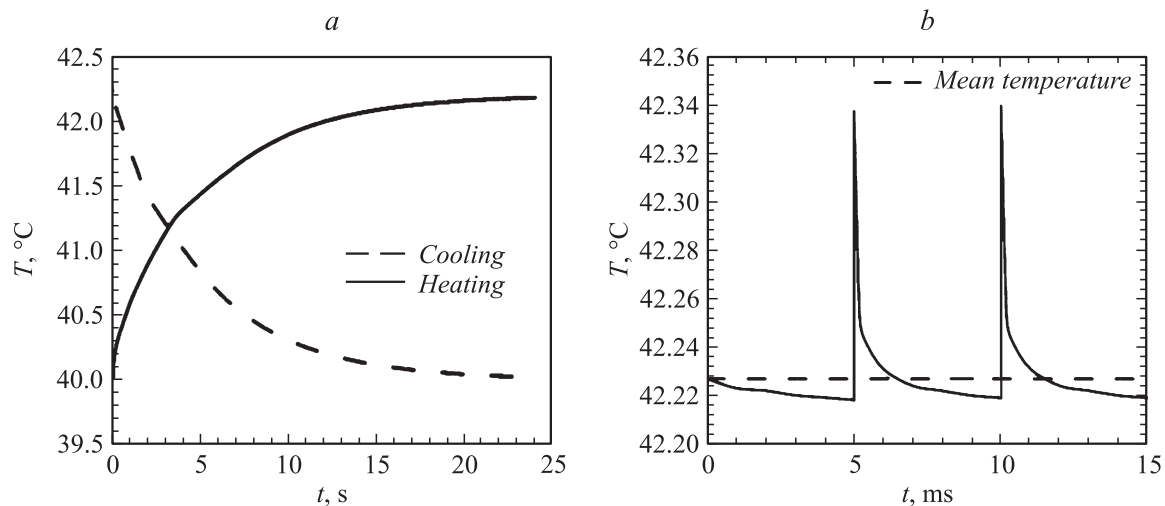
### 2.1. Параметры структуры

Проведен расчет теплового режима бипериодической ускоряющей структуры линейного электронного ускорителя на энергию 50 MeV и импульсный ток 190 mA. Ускоритель состоит из шести секций, каждая из которых питается от клистрона мощностью 3 MW на частоте 2856 MHz. Длительность импульса  $3 \mu\text{s}$ , частота повторений импульсов 200 Hz, мощность потерь в стенках 1.5 MW на 12 ячеек. Средняя ВЧ-мощность, рассеиваемая при таких параметрах на период структуры, состоящей из двух ускоряющих ячеек и ячейки связи между ними, составляет 75 W.

### 2.2. Стационарный процесс нагрева

При проведении тепловых расчетов тепловой объем выглядит как реальная структура, сделанная из металла. Вдоль структуры просверлено 16 охлаждающих каналов диаметром 10 mm. Параметры системы охлаждения: температура воды в основном режиме  $T = 40^\circ\text{C}$ , коэффициент теплоотдачи  $\alpha = 14\,700 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , скорость воды  $v = 2 \text{ m/s}$ . В данной структуре коэффициент теплоотдачи в отличие от структуры КДВМ выше, вычислялся по более точной формуле с корреляций по диаграмме Мууди (Moody Diagram). Данный метод использовался в работе [3].

На рис. 7, а показано распределение нагрева в структуре. Максимальная температура составляет  $T_{\text{max}} = 42.2^\circ\text{C}$ .



**Рис. 8.** *a* — графики зависимости максимальной температуры структуры от времени, *b* — график зависимости максимальной температуры от времени при динамическом импульсном режиме.

Как видно из рис. 7, *a*, самый большой нагрев получается в области пролетного канала. Это обусловлено тем, что стенки диафрагм этой области намного меньше по площади сечения остальных частей структуры и к тому же присутствуют окна магнитной связи. Более того, данный участок дальше всего удален от охлаждающих каналов. Эти факторы затрудняют отвод тепла из этих областей. Полученные в ходе теплового расчета данные, были использованы при расчете деформаций за счет теплового расширения материала (рис. 7, *b*). Расчет проводился с учетом граничных условий, а именно с учетом того, что модель является, на самом деле, частью более общей, закрепленной структуры. Далее был рассчитан последующий сдвиг рабочей частоты. Относительно структуры при равномерной температуре  $40^\circ\text{C}$  он составил  $\Delta f = -(60 \pm 3)$  kHz.

### 2.3. Переходные процессы

В качестве переходных процессов нагрева исследовалась зависимость максимальной температуры структуры от времени при включении и выключении средней и импульсной СВЧ-мощностей. На рис. 8, *a* изображена зависимость температуры от времени при нагревании структуры, начиная с  $40^\circ\text{C}$  и при ее остывании, начиная с нагретой структуры (максимум  $42.2^\circ\text{C}$ ).

Кроме этого, был проведен анализ работы системы в импульсном переходном режиме. Расчет нагрева импульсом (мощность 1.5 MW/12 ячеек) начинался с охлажденной структуры за время между импульсами (5 ms). На рис. 8, *b* представлена зависимость максимальной температуры в структуре в импульсном режиме во время нагрева и остывания от времени.

Итак, установлено, что: колебания максимальной температуры во время работы составляют  $\Delta T = 0.15^\circ\text{C}$ ; максимальная температура в структуре в импульсном

режиме составляет  $T_{\max} = 42.34^\circ\text{C}$ ; максимальная температура в структуре в усредненном режиме составляет  $T_{\max} = 42.2^\circ\text{C}$ .

### 2.4. Исследование работы системы охлаждения

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

Стационарный тепловой расчет для различной входной средней мощности от 0.2 до 1.4 kW показал, что сдвиг частоты в зависимости от мощности потерь в структуре имеет линейную зависимость. Коэффициент наклона полученной зависимости составляет  $K[\text{kHz}] = -(65 \pm 5)(P/P_0)$ .

Стационарный тепловой расчет для различной температуры охлаждающей жидкости от 25 до  $55^\circ\text{C}$  показал, что график зависимости смещения резонансной частоты от температуры охлаждающей жидкости имеет линейный характер с коэффициентом наклона  $K[\text{kHz}/^\circ\text{C}] = -(0.23 \pm 0.03)$ . При расчете учитывалось изменение коэффициента теплопередачи от температуры жидкости из-за изменения свойств воды от температуры.

По результатам расчета нагрева структуры при различных начальных температурах структуры определено время выхода структуры на стационарный процесс в зависимости от начальной температуры структуры для номинальной мощности питания (табл. 4). Для поло-

**Таблица 4.** Времена выхода на установившийся режим для различных начальных температур

$T, ^\circ\text{C}$	30	40	50
Время, s ( $\pm 0.5$ s)	10.5	10.0	9.5

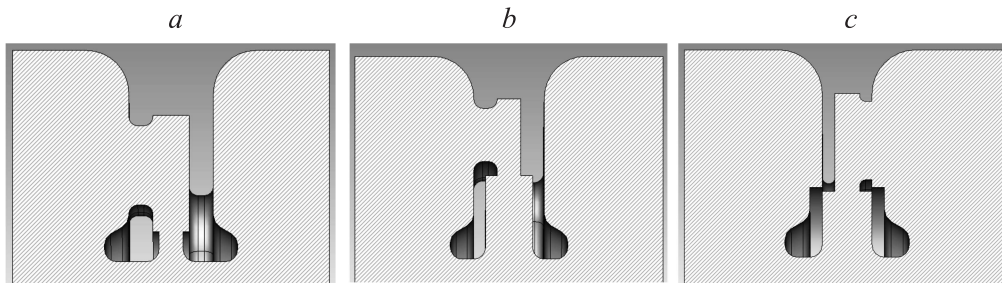


Рис. 9. Варианты БУС с большой связью.

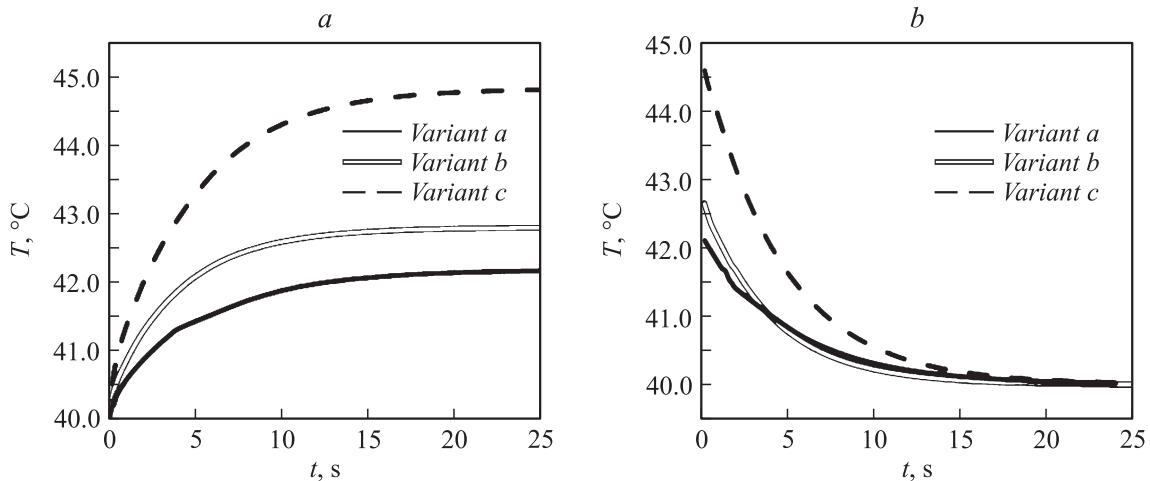


Рис. 10. Зависимости от времени максимальной температуры нагревания (а) и остывания (b) для трех рассмотренных структур.

винной мощности значения при соответствующих температурах совпадают с точностью до 0.5. Время выхода на стационарный процесс определялось по времени, при котором максимальная температура структуры достигала 90% своего установившегося значения (при времени, стремящемся к бесконечности).

**2.5. Тепловой расчет бипериодической ускоряющей структуры с большим коэффициентом связи**

Известно, что основными электродинамическими характеристиками (ЭДХ) бипериодической ускоряющей структуры (БУС) наряду с погонным эффектом шунтовым сопротивлением ( $r_{sh,eff}$ ) является и коэффициент связи структуры ( $k$ ). Ускорители с большим коэффициентом связи имеют лучшую стабильность к изменению параметров ускоренного пучка, менее жесткие допуски на изготовление ускоряющей структуры, лучшую стабильность работы СВЧ-генератора.

На рис. 9 изображены три исследованных варианта конструкции БУС с большим коэффициентом связи при большом значении погонного эффективного шунтового сопротивления. Это структура с расширением ячейки связи в дрейфовой трубке (рис. 9, а), структура с расширением ячейки связи в дрейфовой трубке и уменьшением

длины щели связи путем расширения ускоряющей ячейки (рис. 9, b) и структура с расширением ячейки связи в дрейфовой трубке и уменьшением длины щели связи при помощи выточки в ускоряющей ячейке в месте соприкосновения с щелью (рис. 9, c) ЭДХ для этих вариантов ускорителей приведены в табл. 5. На рис. 10 приведены

Таблица 5. ЭДХ трех вариантов структуры

Структура	а	б	в
$k, \%$	15.5	15.87	19.2
$\beta, \%$	-22.4	-22.5	-26.9
$r_{sh,eff}, M\Omega/m$	76.77	80.8	75.84
$Q$	15049	16088	14075
$E_{max}/E_{уск.}$	3.46	3.2	4.14

Таблица 6. Сдвиг частоты и нагрева для трех вариантов структур

Вариант	Максимальный нагрев $\Delta T, \text{ }^\circ\text{C}$	Сдвиг частоты $\Delta f, \text{ kHz}$
а	2.2	60
б	2.8	130
в	4.9	380

зависимости от времени максимальной температуры нагрева и остывания для трех рассмотренных структур, а в табл. 5 для этих же структур приведены обобщенные данные. Также в табл. 5 представлены значения сдвига частоты в них при нагревании. Для структуры вида рис. 9, а значение сдвига частоты на градус от величины вводимой СВЧ-мощности линейно со значением

$$\left\langle \frac{|\Delta f|}{1^\circ\text{C}} \right\rangle = (26.7 \pm 1.3) \frac{\text{kHz}}{1^\circ\text{C}}.$$

## Заключение

В работе проведено численное моделирование нагрева ускоряющей структуры, используемых при создании линейных ускорителей электронов, работающих как в режиме бегущей, так и стоячей волн. На примере круглого диафрагмированного волновода с магнитной связью и бипериодической ускоряющей структурой проанализирована работа охлаждающих систем. По результатам тепловых расчетов найдены необходимые параметры охлаждающих систем, при которых СВЧ-нагрев структур не вызывает значительного изменения необходимых характеристик.

## Список литературы

- [1] *Kutsaev S.V., Sobenin N.P., Nikolskiy K.I.* Hybrid electron linac based on magnetic coupled accelerating structure. PAC-2011, NY, USA, 2011.
- [2] *Zavadtsev D.A.* // Problems of atomic science and technology. Series „Nuclear Physics Investigations“. 2004. N 2. P. 87–89.
- [3] *Парамонов В., Скасырская А., Floettmann K., Stephan F.* // Problems of atomic science and technology. Series „Nuclear Physics Investigations“. 2003. N 3. P. 51–54.
- [4] *Крейт Ф., Блэк У.* Основы теплопередачи: Пер. с англ. М.: Мир, 1983. 512 с.