

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 621.384.6

РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СТРУКТУР RFQ И IH-DTL
ДЛЯ КОМПАКТНОГО НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА DARIA

© 2025 г. А. О. Гребешков^{a, b, *}, С. Н. Андреев^{a, b, **}, А. Л. Ситников^a,
А. И. Семенников^a, Г. Н. Кропачев^a, Т. В. Кулевой^a

^aНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

^bНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”, Москва, 111250 Россия

*E-mail: g.andrey444@gmail.com

**E-mail: andreevstn@mail.ru

Поступила в редакцию 20.06.2023 г.

После доработки 25.04.2024 г.

Принята к публикации 22.05.2024 г.

В ККТЭФ НИЦ КИ (Курчатовский Комплекс Теоретической и Экспериментальной Физики Национальный Исследовательский Центр “Курчатовский Институт”) ведется разработка линейного ускорителя для компактного нейтронного источника DARIA (DARIA-neutron source Dedicated to Applied Research and Industrial) [1]. Линейный ускоритель, состоящий из двух типов ускоряющих резонаторов: RFQ и IH-DTL, должен обеспечить ускорения протонного пучка с током до 100 мА до энергии 13 МэВ. При работе ускоритель подвергается тепловым нагрузкам, которые могут вывести его из рабочего режима, путем влияния термодеформаций его конструкции на рабочую частоту. С целью обеспечения стабильности электродинамических параметров ускоряющих структур, необходимо предусмотреть систему охлаждения, обеспечивающую термостабилизацию его конструкции. В работе представлены результаты расчета системы охлаждающих каналов в элементах конструкции резонаторов при работе ускорителя в импульсном режиме с коэффициентами заполнения (duty factor) 1–5%.

Ключевые слова: система охлаждения, линейный ускоритель, нейтронный источник

DOI: 10.56304/S2079562924050166

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, совместными усилиями консорциума научно-исследовательских центров под руководством ККТЭФ НИЦ КИ (Курчатовский Комплекс Теоретической и Экспериментальной Физики Национальный Исследовательский Центр “Курчатовский Институт”) ведется разработка нейтронного источника DARIA (neutron source Dedicated to Applied Research and Industrial Application) [1]. Проект DARIA направлен на разработку и создание компактного нейтронного источника университетского класса, готового к запуску в “серийное” производство.

Для получения потока нейтронов проекту требуется протонный пучок с током до 100 мА и энергией 13 МэВ при длительности импульса 100 мкс и коэффициенте заполнения 1% (коэффициент заполнения – отношение длительности импульса к периоду). Ускорение протонного пучка происходит в линейном ускорителе, который состоит из двух типов ускоряющих резонаторов работающих на частоте 162.5 МГц (рис. 1): ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусиров-

кой (ПОКФ, международная аббревиатура RFQ), ускоряющего пучок протонов до 3 МэВ, и нескольких ускорителей с трубками дрейфа (IH-DTL), ускоряющих протоны до 13 МэВ [2]. Обечайка резонаторов и внутренние элементы конструкций выполнены из меди, фланцы – стальные.

Для формирования ускоряющего электрического поля в резонаторах возбуждается электромагнитное высокочастотное (ВЧ) поле. ВЧ поле приводит к индуцированию поверхностного тока, протекающего по внутренним поверхностям резонаторов. Из-за омического сопротивления материала возникают электрические потери, которые приводят к нагреву ускоряющих структур. Нагрев сопровождается термическими деформациями, которые влечут за собой изменения электродинамических характеристик (ЭДХ), в частности, собственной резонансной частоты, что может привести к выводу ускорителя из рабочего режима. Для предотвращения этого резонаторы необходимо обеспечить системой охлаждения как внутренних элементов конструкции (электродов в RFQ, трубок дрейфа в IH-DTL), так и наружных (обечайки резонаторов).

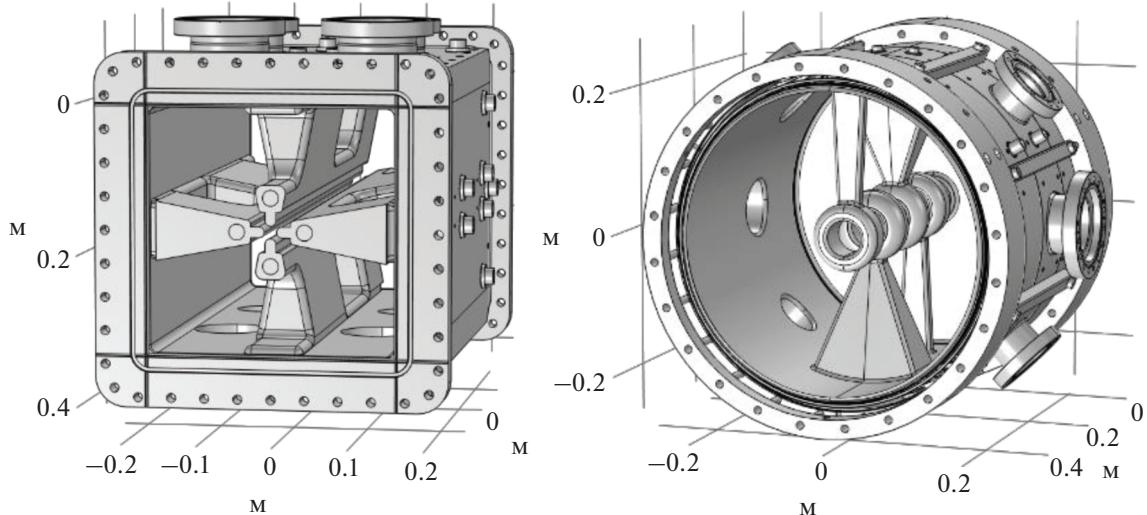


Рис. 1. Модели ускоряющих структур.

Основываясь на расчетах добротности резонансных структур [2] для обеспечения требуемых характеристик протонного пучка необходимо ВЧ поле с длительность импульса ≈ 300 мкс (коэффициент заполнения 3%). Исходя из этого в работе представлены результаты численного моделирования тепловой нагрузки ускорителя с предложенной системой охлаждающих каналов при коэффициентах заполнения вплоть до 5% (более чем с полуторным коэффициентом запаса).

1. ПОСТАНОВКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ЗАДАЧИ

В работе проводится численное моделирование ЭДХ и теплового состояния резонансных структур в среде COMSOL Multiphysics 6.1 [3].

Основная задача состояла в расчете минимального значения расхода охлаждающей жидкости – дистиллированной воды, при котором максимальная температура нагрева структур не превысит 50°C. Ниже данной температуры, согласно проведенным оценкам, термодеформации не приводят к неправимому уходу резонансной рабочей частоты.

Моделирование, проводимое в работе, состояло из двух основных этапов. На первом проводился расчет ЭДХ резонансных структур для получения распределений собственных потерь, приводящих к нагреву. Используя полученные распределения, моделировался нагрев структуры и вызванные им деформации.

Моделирование электродинамических характеристик

Электромагнитный резонатор представляет собой структуру, предназначенную для накопления электромагнитной энергии определенной ча-

стоты в пределах своего объема. Для расчета распределения электромагнитного поля в COMSOL Multiphysics реализован модуль – The Electromagnetic Waves, Frequency Domain. Данный интерфейс позволяет решить задачу по поиску собственных частот колебаний, в рамках которой определяются резонансные моды структуры. В нем используется метод конечных элементов для численного решения уравнений Максвелла в частотной области:

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0,$$

где μ – магнитная проницаемость среды, \mathbf{E} – вектор напряженности электрического поля, ϵ – диэлектрическая проницаемость среды, σ – удельная проводимость среды. Индукция магнитного поля вычисляется как:

$$j\omega \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{E}.$$

Переменное электрическое поле и связанное с ним магнитное поле не проникает в глубь проводника, а сосредоточены в относительно тонком поверхностном слое (скин-слое). Возникающие в этом слое вихревые токи приводят к тому, что часть электромагнитной энергии преобразуется в теплоту и приводит к нагреву резонансных структур.

Основываясь на распределениях электрического и магнитного поля, соответствующих рабочей частоте, определялось распределение поверхностных потерь, с учетом нормировки на параметры рабочего режима, полученные из расчета динамики пучка: напряжение между электродами для структуры RFQ и амплитуда напряженности электрического поля между центральными электродами для структуры IH-DTL.

Моделирование теплового состояния

Для получения полей температур и расчета необходимых расходов охлаждающей воды при различных коэффициентах заполнения, проводился оптимизационный расчет теплового состояния резонансных структур. Целью оптимизации являлась минимизация расхода воды при поддержании максимальной температуры структур, не превышающей 50°C.

В элементах конструкции резонансной структуры численно решается стационарное уравнение теплопроводности:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_k},$$

где q – плотность теплового потока [Вт/м²], λ – коэффициент теплопроводности материала [Вт/м К], $\partial T / \partial x_k$ – градиент температуры.

Движение жидкости в каналах, и возникающий теплообмен между структурой и охлаждающей жидкостью моделируется с использованием встроенного модуля – PipeFlow. Данный модуль содержит встроенный физический интерфейс, который позволяет решать стационарные уравнения сохранения массы, импульса и энергии жидкости внутри системы охлаждения на основе решения уравнений, определенных на отрезках и криволинейных сегментах каналов в местах их расположения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(u_i)}{\partial x_i} &= 0, \\ u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[2(v + v_{typ}) \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right], \\ u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{v}{Pr} + \frac{v_{typ}}{Pr_{typ}} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right], \end{aligned}$$

где u_i – i -я компонента вектора скорости [м/с], ρ – плотность жидкости [кг/м³], $\partial p / \partial x_i$ – градиент давления, v – кинематическая вязкость жидкости [м²/с], v_{typ} – турбулентная вязкость, Pr – число Прандтля, Pr_{typ} – турбулентное число Прандтля.

Данный подход позволяет избежать ресурсоемкого моделирования гидродинамики в трехмерной постановке, при этом сохраняя приемлемую для данного расчета точность. На границах, разделяющих твердую поверхность и область течения охлаждающей жидкости, используются условия сопряжения температуры и теплового потока.

В качестве граничных условий на внутренних поверхностях структуры задается распределение тепловых потерь полученное в результате моделирование электродинамики. На внешних поверхностях задается условие теплообмена с окружающей средой за счет свободной конвекции. Следует отметить, что часть тепла, отводимая из-

Таблица 1. Электродинамические характеристики резонаторов

	RFQ	IH-DTL
Собственная частота, МГц	162.5	162.5
Добротность	≈11 500	≈13 000
Импульсная мощность потерь, кВт	≈130	≈110

лучением при данных температурах достаточно мала и при моделировании не учитывалась.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты моделирования электродинамических характеристик ускоряющих структур

В результате расчета ЭДХ были найдены собственные частоты колебаний резонаторов, соответствующие рабочей, и получены распределения электрического и магнитного поля в вакуумном объеме структур. Значения собственных частот и добротности приведены в табл. 1.

Рассчитанные распределения полей нормировались на рабочие параметры структур, полученные из расчета динамика пучка [2] – напряжение между электродами $U = 173$ кВ для структуры RFQ, и амплитуда напряженности электрического поля по продольной оси между центральными электродами $E = 90$ кВ/см – для структуры IH-DTL. Полученные значения импульсной мощности собственных потерь также приведены в табл. 1.

Рисунок 2 иллюстрирует распределение теплового потока, возникающего за счет поверхностных потерь на внутренней поверхности структур. Наибольшие потери для структуры RFQ наблюдаются в окнах магнитной связи, для структуры IH-DTL – на стойках трубок дрейфа.

Каналы охлаждения ускоряющих структур

Основываясь на полученных значениях тепловых потерь, был проведен расчет теплового состояния резонансных структур с учетом теплосъема, возникающего только за счет свободно-конвективного охлаждения. Расчет показал, что температуры нагрева более чем на 200°C превышают допустимые. Данный факт говорит о том, что для обеспечения термостабилизации свободно-конвективного теплообмена недостаточно и необходимо организовать систему охлаждения элементов конструкции.

Система охлаждения состоит из каналов различной конфигурации, основные характеристики которых приведены в табл. 2. При выборе расположения каналов помимо основного фактора – наибольшей эффективности отвода выделяющегося тепла, также учитывалась реальная возможность их реализации при изготовлении на производстве.

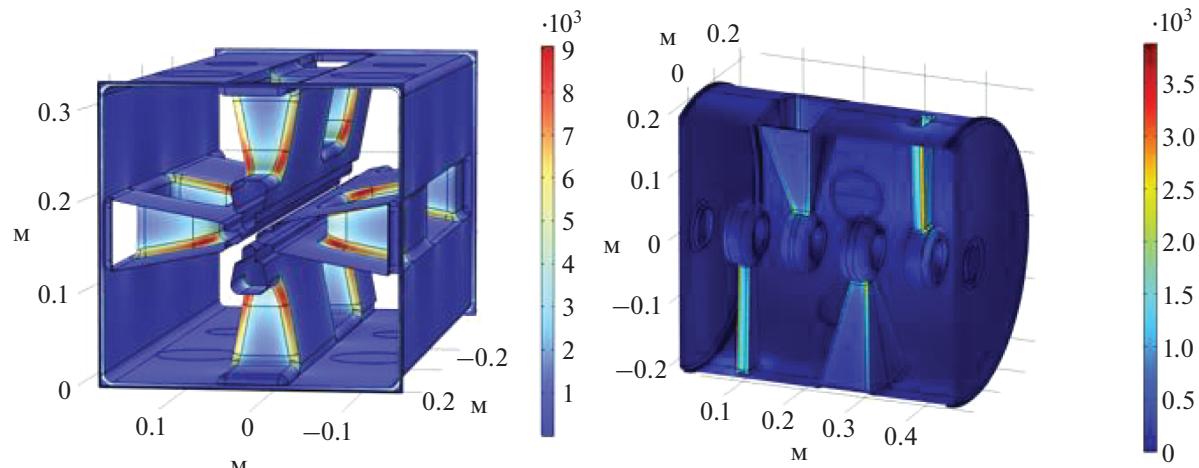


Рис. 2. Распределение плотности поверхностных потерь [$\text{Вт}/\text{м}^2$].

На рис. 3 представлено расположение каналов охлаждения в элементах структур, претерпевающих наибольший нагрев – в электроде секции RFQ (на рисунке слева), в трубках дрейфа в IH-DTL (рисунок справа).

Результаты моделирования теплового состояния ускоряющих структур

В результате теплового расчета с учетом системы охлаждения найдены распределения температуры на поверхности структур. Путем применения встроенного в COMSOL Multiphysics алгоритма оптимизации, были получены значения расходов охлаждающей воды при которых максимальная температура поверхностей не превышает 50°C для каждого значения коэффициента заполнения из диапазона 1–5%. Распределения температур представлены на рис. 4. В табл. 3 приведены значения расходов охлаждающей воды на каждую из секций, а также общего расхода для всего ускорителя, состоящего из 7 секций RFQ и 6 секций IH-DTL.

Влияние температурных деформаций на собственные частоты ускоряющих структур

Для оценки изменений собственных частот колебаний, связанных с температурным расширением, был проведен расчет термодеформаций. По результатам данного расчета деформированная геометрия резонаторов вновь использовалась для определения собственных частот.

Распределение деформаций, представлено на рис. 5. При расчете учитывалось, что структуры лежат на опорных стойках. В табл. 4 представлены максимальные смещения по координатным осям, а также изменения собственных частот колебаний.

Для компенсации ухода рабочей частоты, один из вариантов решения, может быть изначальный учет данных отклонений при конструировании структур, а именно заложить полученные значения смещения частоты, вызванные температурными деформациями, таким образом, чтобы при нагреве резонаторов до установленной температуры частота “выходила” на рабочую. Помимо данного решения, предполагается использо-

Таблица 2. Характеристики каналов охлаждения

Расположение каналов	Кол-во	Поперечное сечение	Гидравлический диаметр, мм	Общая протяженность, мм
Секция RFQ				
Корпус	8	Круглое	10	2900
Корпус	4	Прямоугольное	8.9	2800
Электроды	28	Круглое	10, 20	7100
Секция IH-DTL				
Фланец	2	Прямоугольное	12.1	1900
Корпус	8	Прямоугольное	12	2400
Стойки трубок дрейфа	16	Круглое	4	2400
Трубки дрейфа	4	Прямоугольное	15.2	220

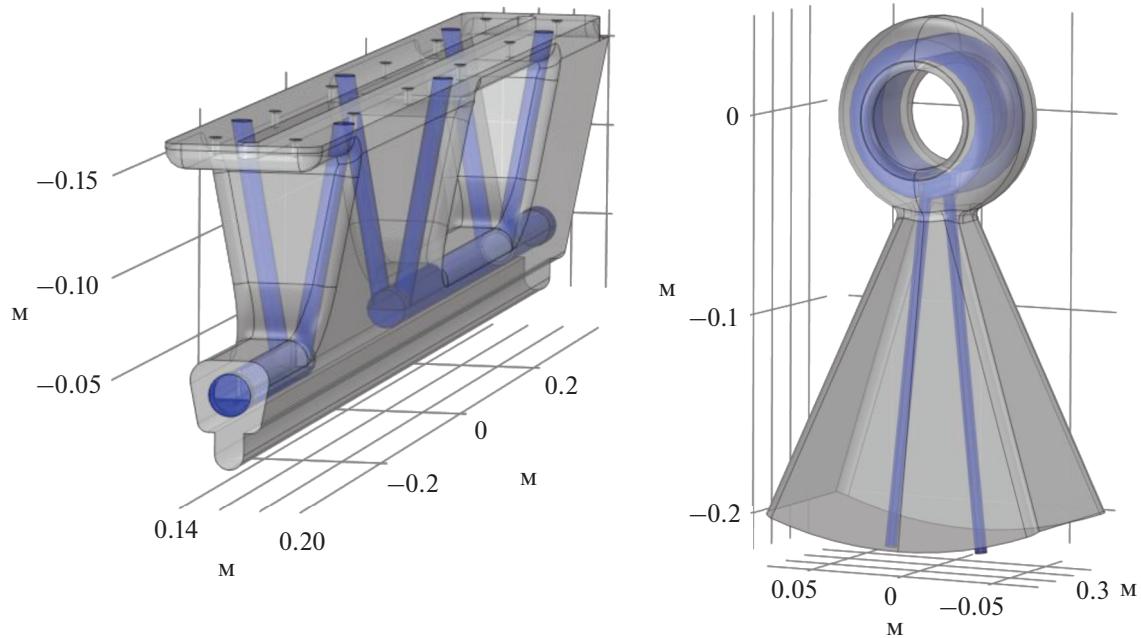


Рис. 3. Каналы охлаждения.

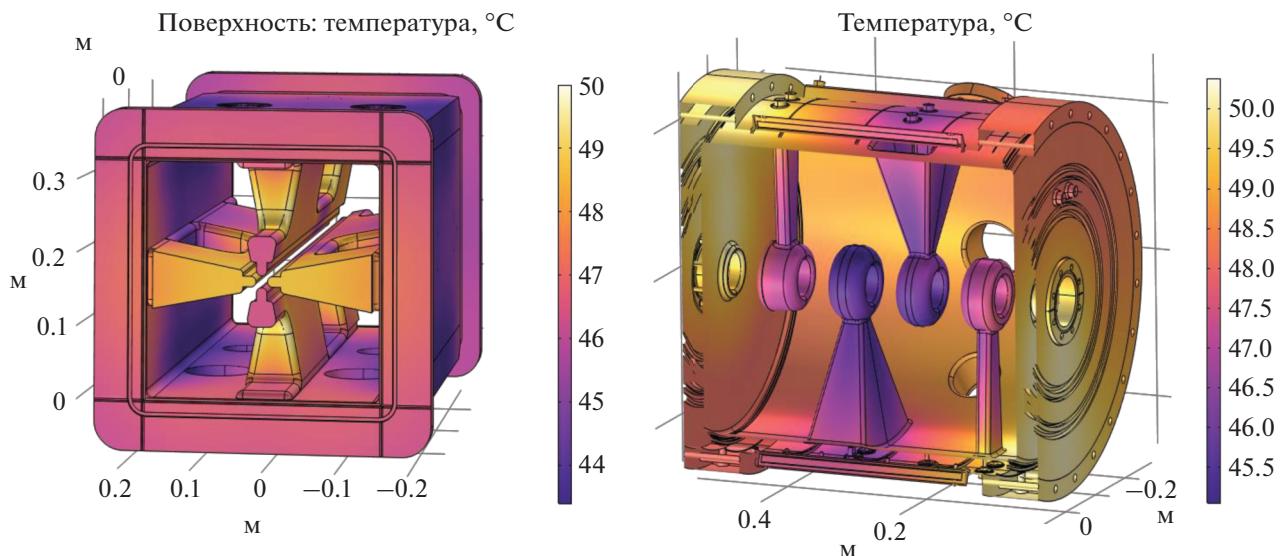


Рис. 4. Распределение температур на поверхности структур.

вать подвижные плунжеры, установленные в боковых патрубках обечайки резонаторов [2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате численного моделирования, проведенного в данной работе, были получены: электрические и магнитные поля, плотность тепловых потерь, распределения температуры и смещения, возникающие за счет термодеформаций, для ускоряющих структур проекта DARIA.

Таблица 3. Расход охлаждающей воды

Коэффициент заполнения	Sекция RFQ	Sекция IH-DTL	Общий
	Расход воды, л/мин		
0.01	8	7	105
0.02	18	12	198
0.03	22	22	286
0.04	26	28	350
0.05	32	37	446

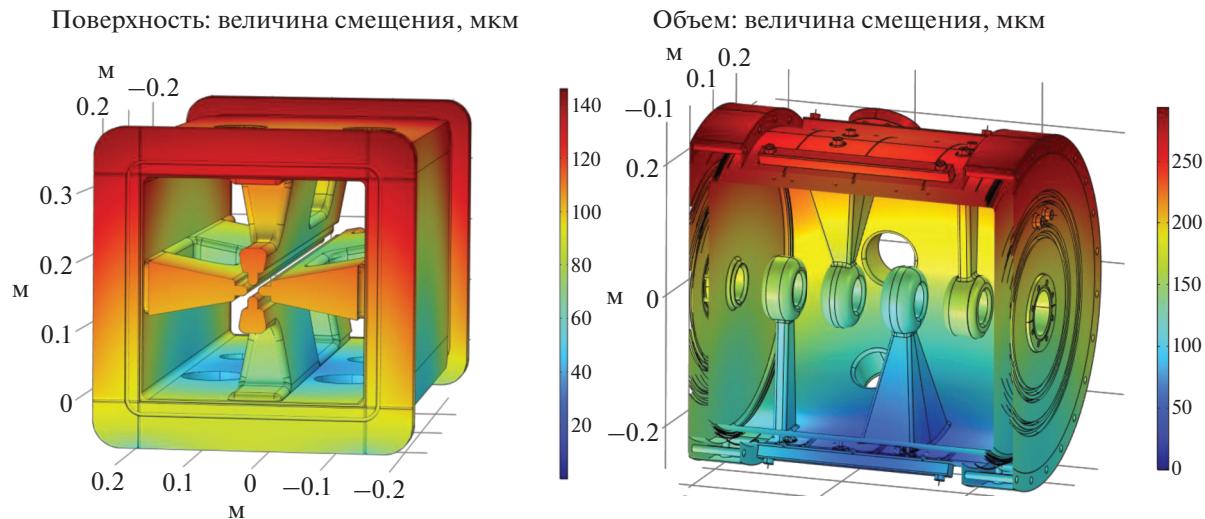


Рис. 5. Поле смещений.

Таблица 4. Расход охлаждающей воды

	Секция RFQ	Секция IH-DTL
Максимальное смещение по оси X, мкм	137	143
Максимальное смещение по оси Y, мкм	146	267
Максимальное смещение по оси Z, мкм	141	120
Изменение частоты, кГц	400	130

По полученным данным, для каждой из структур рассчитаны минимальные расходы охлаждающей воды для поддержания рабочего температурного режима при работе с коэффициентами заполнения вплоть до 5%. Также была проведена оценка деформаций, вызванных температурным расширением и предложено решение для предотвращения ухода рабочей частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Grigoriev S., Iashina E., Pavlov K. // J. Synch. Investig. 2019. V. 13. P. 1132–1134.
2. Kropachev G., Sitnikov A., Kulevoy T. // Cybern. Phys. 2022. V. 11 (4). P. 205–209.
3. <https://www.comsol.ru>.

Calculation of the Cooling System for the RFQ and IH-DTL Structures for the DRIA Compact Neutron Source

A. O. Grebeshkov^{1, 2, *}, S. N. Andreev^{1, 2, **}, A. L. Sitnikov¹,
A. I. Semennikov¹, G. N. Kropachev¹, and T. V. Kulevoi¹

¹National Research Centre Kurchatov Institute, Moscow, 123182 Russia

²National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

*e-mail: g.andrey444@gmail.com

**e-mail: andreevstn@mail.ru

Received June 20, 2023; revised April 25, 2024; accepted May 22, 2024

Abstract—A linear accelerator for the compact neutron source dedicated to applied research and industrial (DRIA) [1] is under development at Kurchatov Complex of Theoretical and Experimental Physics, National Research Centre Kurchatov Institute. This accelerator consisting of RFQ and IH-DTL types of accelerating cavities should ensure the acceleration of a proton beam with a current up to 100 mA to an energy of 13 MeV. The operating accelerator is subjected to thermal loads, which can break its working regime due to the effect of thermal strains of its units on the working frequency. To ensure the stability of electrodynamical parameters of accelerating structures, a cooling system should be used to ensure the thermal stabilization of its design. The calculation of the system of cooling channels in elements of the design of cavities at the operation of the accelerator in the pulsed regime with a duty factor of 1–5%.

Keywords: cooling system, linear accelerator, neutron source