

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА

УДК 537.626:538.945

ПРОТОТИП СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ОНДУЛЯТОРА С  
ПЕРИОДОМ 12 мм И ПОЛЕМ 0.7 Тл<sup>1</sup>

©2024 г. С. В. Хрущев<sup>a,b,\*</sup>, Н. А. Мезенцев<sup>a,b</sup>, А. Н. Сафронов<sup>a</sup>,  
В. А. Шкаруба<sup>a,b</sup>, В. М. Цуканов<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера  
Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 11

<sup>b</sup>Центр коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов”  
Института катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 630559, Новосибирская обл., р.п. Кольцово, Никольский пр., 1

\*e-mail: S.V.Khrushev@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 01.12.2023 г.

После доработки 29.02.2024 г.

Принята к публикации 17.04.2024 г.

В Институте ядерной физики СО РАН разработан прототип сверхпроводящего ондулятора с периодом 12 мм и полем 0.7 Тл. Вертикальная апертура для пучка составляет 5 мм при межполюсном зазоре 7 мм. В статье обоснован выбор параметров ондулятора, описана его конструкция, основанная на горизонтальном рейстреке с нейтральными полюсами, приведены расчетные характеристики ондулятора и генерируемого им излучения.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Для генерации синхротронного излучения с необходимыми характеристиками в настоящее время на накопительных кольцах широко используются вигглеры и ондуляторы. Использование сверхпроводящих магнитов позволяет значительно уменьшить период устройства и, соответственно, разместить больше полюсов на той же длине при сохранении величины магнитного поля по сравнению с аналогичными устройствами на основе

---

<sup>1</sup> Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, Новосибирск.

постоянных магнитов. Ниже описан прототип одного из сверхпроводящих ондуляторов с минимальным периодом.

## 2. ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОНДУЛЯТОРА

Наиболее востребованными для экспериментов с СИ являются длины волн ондуляторного излучения порядка одного ангстрема ( $\epsilon=12.4$  кэВ), которые при малом периоде ондулятора ( $\sim 12$  мм) генерируются на гармониках 1–3–5. Это снижает требования к величине фазовой ошибки, которая определяется геометрической точностью изготовления полюсов ондулятора, так как большая фазовая ошибка снижает амплитуду излучения только на более высоких гармониках.

Для обеспечения таких требований к спектру излучения для энергии электронов  $E=3$  ГэВ требуется период ондулятора в диапазоне 11–13 мм и магнитное поле 0.7–1 Тл. Величина магнитного поля для периодической структуры зависит как от межполюсного зазора, так и от длины периода. Величина межполюсного зазора определяется условиями движения электронов в накопителе. В современных источниках синхротронного излучения допускается уменьшение вертикальной апертуры для пучка электронов до 5–6 мм, что дает возможность уменьшить межполюсный зазор до 7–8 мм, что в свою очередь позволяет увеличить уровень магнитного поля. Использование же для изготовления электромагнитных полюсов ондулятора обмоток из сверхпроводящего провода NbTi, работающего при криогенных температурах, дает возможность еще больше увеличить уровень магнитного поля даже при одновременном уменьшении геометрических размеров катушек, что позволяет разместить на доступной длине большее количество магнитных полюсов. Использование сверхпроводящих материалов дает значительные преимущества для получения более высокого поля по сравнению с постоянными магнитами.

## 3. РАСЧЕТ ПОЛЯ ОНДУЛЯТОРА

Конструкция сверхпроводящего ондулятора основана на схеме с нейтральными полюсами [1–3]. Для расчетов магнитного поля был выбран коммерчески доступный на сегодняшний день сверхпроводящий провод диаметром 0.55 мм с предельно возможными характеристиками (критическим током не менее 240А в поле 7 Тл), изготовленный в научно-исследовательском институте неорганических материалов им. А.А.Бочвара (ВНИИНМ). Основные параметры провода приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Параметры сверхпроводящего провода

Диаметр провода с изоляцией и без, мм	0.55/0.50
Отношение NbTi/Cu	1.4
Число нитей NbTi в проводе	312
Диаметр нитей NbTi, мкм	37
Критический ток в поле 7 Тл, А	240

В расчетах ниже период ондулятора выбран равным 12 мм, а межполюсный зазор принят равным 7 мм. Максимальное поле в ондуляторе определяется критическими токами сверхпроводящего провода. Для определения критического тока в обмотке рассматривается распределение поля по вертикали в области максимального поля (на внутренней части радиусного закругления обмотки типа рейстрек). На рис. 1 представлена величина магнитного поля при сканировании обмотки по вертикали.

**Рис. 1.** Распределение поля в обмотке по вертикали.

На рис. 2 представлено положение точек, характеризующих поле и ток в обмотке, относительно критических кривых выбранного сверхпроводящего провода для температур 4.2 и 3.5 К. Критический ток в обмотке при температуре 4.2 К равен 710 А, что соответствует полю в медианной плоскости 0.77 Тл, при температуре 3.5 К равен 775 А, что соответствует полю в медианной плоскости 0.8 Тл. При этом мы можем считать допустимым рабочим полем 0.7 Тл, при котором ток в обмотке составляет 588 А.

**Рис. 2.** Точки, характеризующие поле и ток в обмотке, относительно критических кривых выбранного сверхпроводящего провода.

#### 4. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОНДУЛЯТОРА

Важной характеристикой динамики пучка является однородность распределения магнитного поля в поперечном направлении. Эта характеристика зависит от поперечного размера магнитных полюсов. Обычно требования к поперечной однородности предполагают изменение поля в пределах 0.5% при поперечном отклонении от оси в пределах 10 мм. На рис. 3 представлено поперечное распределение поля вблизи орбиты пучка электронов. Можно видеть, что обычные требования выполняются с большим запасом. Основные параметры ондулятора приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Основные параметры ондулятора

Период, мм	12
Магнитный зазор, мм	7
Вертикальная апертура для пучка, мм	5
Номинальное магнитное поле, Тл	0.7
Число слоев в обмотке основного полюса	3
Число витков в слое обмотки основного полюса	10(9)
Номинальный ток в основных обмотках, А	588
Критический ток обмотки при 4.2К, А	710
Критический ток обмотки при 3.5К, А	775
Магнитное поле, соответствующее критическому току в основной обмотке, Тл	0.77

**Рис. 3.** Поперечное распределение магнитного поля.

Для расчетов была выбрана модель ондулятора, состоящая из 10 основных периодов и дополнительных боковых полюсов с полем  $\frac{1}{4}$  и  $\frac{3}{4}$  от основных полюсов. На рис. 4 представлено распределение магнитного поля относительно продольной оси ондулятора.

**Рис. 4.** Продольное распределение магнитного поля.

Характер излучения из ондулятора также сильно зависит от орбиты пучка в ондуляторе. Поэтому для замыкания орбиты пучка, пролетающего через магнитное поле ондулятора, необходимо минимизировать величины первого и второго интегралов магнитного поля вдоль продольной координаты.

Расчетные угол отклонения орбиты и поперечное отклонение пучка электронов в ондуляторе относительно продольной координаты для энергии пучка 3 ГэВ приведены на рис. 5 и 6.

**Рис. 5.** Распределение угла отклонения орбиты вдоль продольной оси.

**Рис. 6.** Поперечное отклонение пучка электронов от продольной оси.

Период ондулятора равен 12 мм, следовательно, при полноразмерной технологически доступной для изготовления магнитной системе длиной около 2 м в ондуляторе будет содержаться 160 периодов и 4 крайних полюса с полем  $\frac{1}{4}$  и  $\frac{3}{4}$  от основных полюсов.

На рис. 7 показаны спектральные потоки фотонов из такого ондулятора при изменении магнитного поля от нуля до максимума,  $E=3$  ГэВ,  $I=0.4$  А. Можно отметить, что вследствие того, что значение  $K < 2$ , некоторые энергии фотонов спектра излучения в нечетных гармониках будут недоступны.

**Рис. 7.** Спектральный поток фотонов при изменении поля в ондуляторе от нуля до максимального рабочего поля.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были проведены расчеты основных параметров и продемонстрирована возможность создания сверхпроводящего ондулятора с периодом 12 мм, а также определены его основные геометрические и физические параметры. Были подтверждены расчетом предельно достижимые параметры такого ондулятора по максимальной величине магнитного поля 0.7 Тл при температуре 4.2 К и минимально допустимом межполюсном зазоре 7 мм, что позволяет сделать апертуру вакуумной камеры равной 5 мм. Была обоснована и определена конструкция ондулятора на основе магнитной системы с активными и нейтральными полюсами, которая позволяет вдвое уменьшить количество катушек и число электрических контактов между катушками, что снижает мощность, выделяемую на этих соединениях при протекании тока. Была разработана конструкция 40-периодного рабочего прототипа ондулятора с периодом 12 мм. В настоящее время идет изготовление экспериментального образца 40-периодного ондулятора. Проведение испытаний прототипа магнитной системы ондулятора в жидком гелии, включая измерения магнитного поля и сравнение результатов измерений с расчетными значениями, запланировано на 2023 год.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Соглашения с Минобрнауки России № 075-15-2021-1359 и частично при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания Института химии твердого тела и механохимии СО РАН (проект № FWUS-2021-0004).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Khrushchev S., Mezentsev N., Shkaruba V., Syrovatin V., Tsukanov V* // Physics Procedia (SRF-2016). 2016. V. 84. P. 62. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.011>
2. *Mezentsev N.A., Khrushchev S.V., Shkaruba V.A., Syrovatin V.M., Tsukanov V.M.* // Proc. RuPAC'16. St. Petersburg, Russia. 2017. P. 21. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2016-TUCAMH01>
3. *Bragin A., Khrushev S., Lev V. et al.* // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2018. V. 28. № 4. P. 1. <https://doi.org/10.1109/TASC.2018.2805162>

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

**Рис. 1.** Распределение поля в обмотке по вертикали.

**Рис. 2.** Точки, характеризующие поле и ток в обмотке, относительно критических кривых выбранного сверхпроводящего провода.

**Рис. 3.** Поперечное распределение магнитного поля.

**Рис. 4.** Продольное распределение магнитного поля.

**Рис. 5.** Распределение угла отклонения орбиты вдоль продольной оси.

**Рис. 6.** Поперечное отклонение пучка электронов от продольной оси.

**Рис. 7.** Спектральный поток фотонов при изменении поля в ондуляторе от нуля до максимального рабочего поля:  $\lambda=12$  мм,  $E=3$  ГэВ.

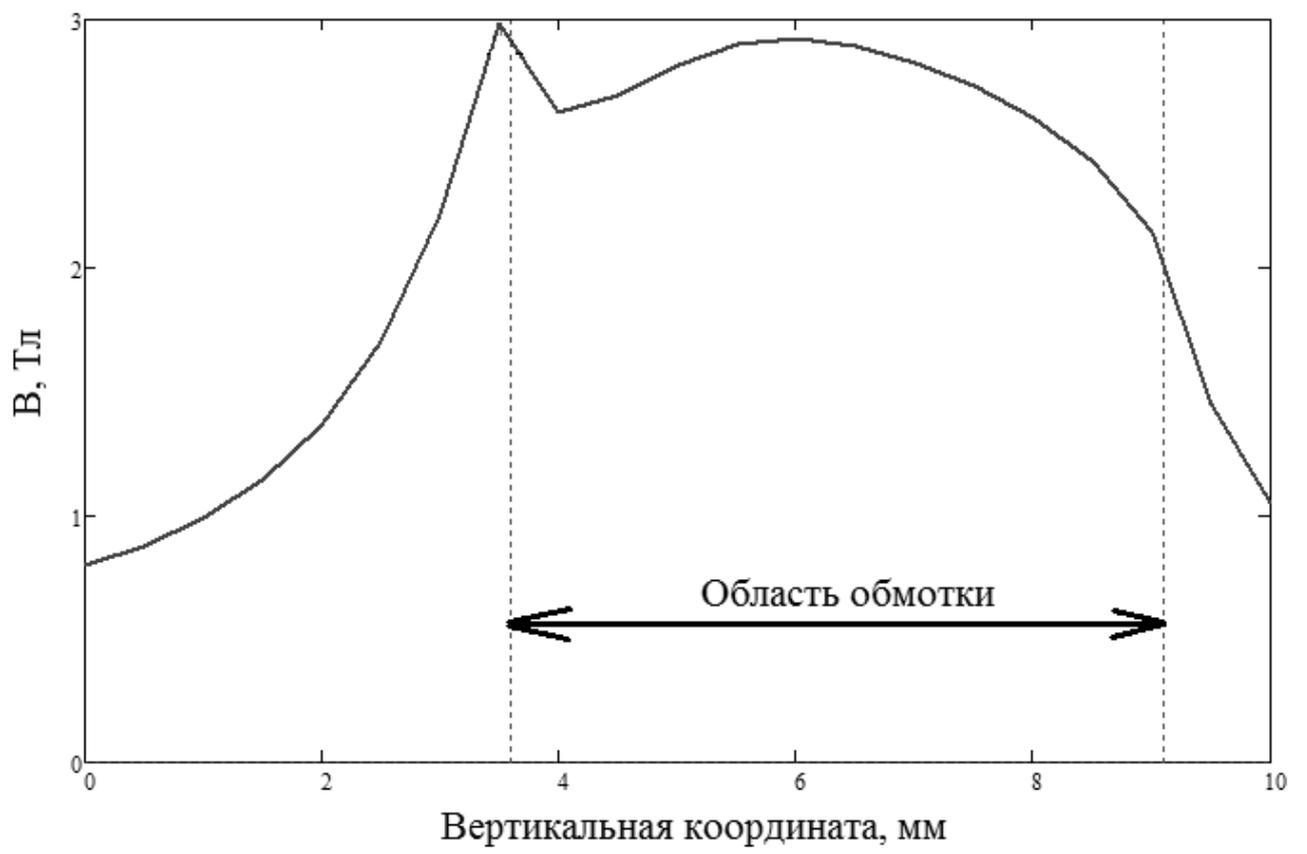


Рис. 1

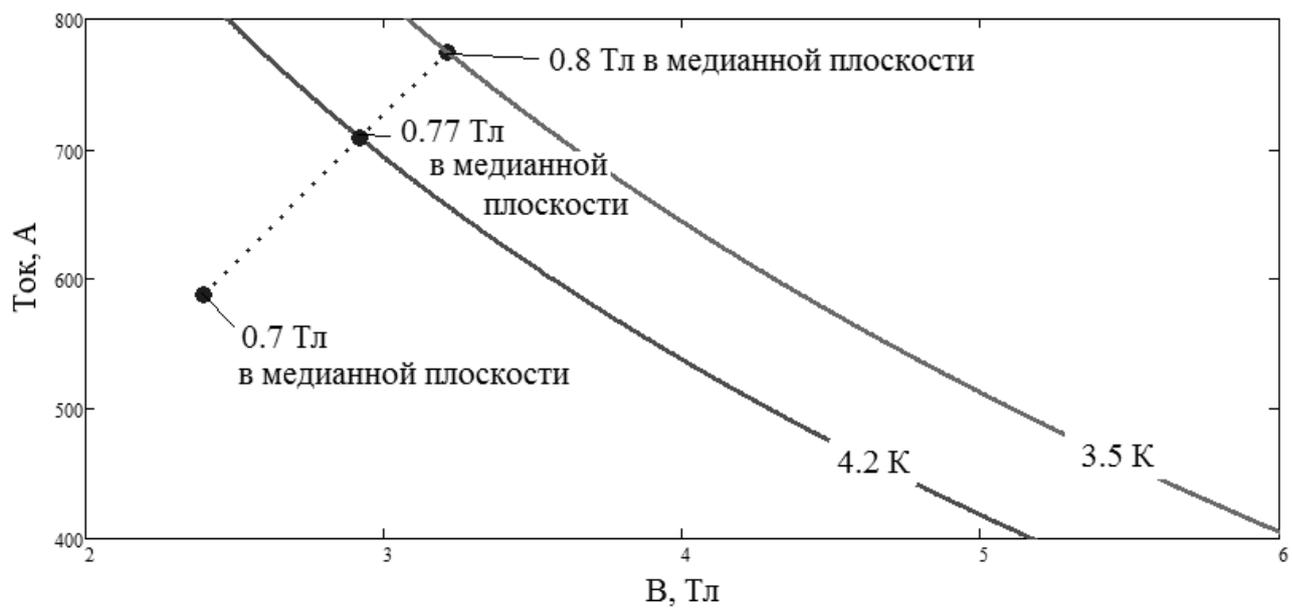
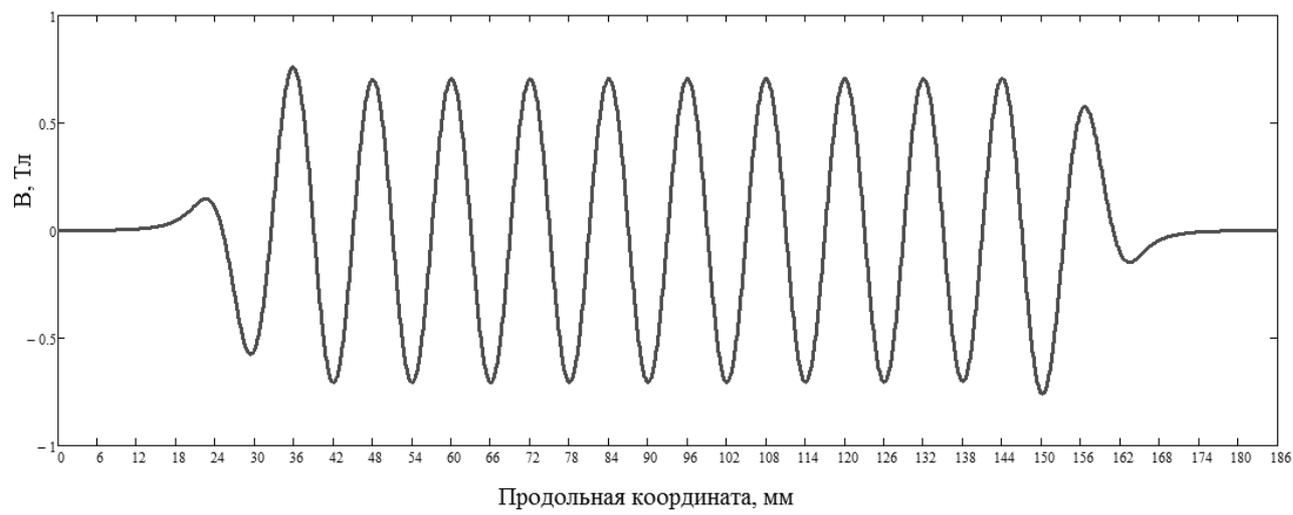


Рис. 2



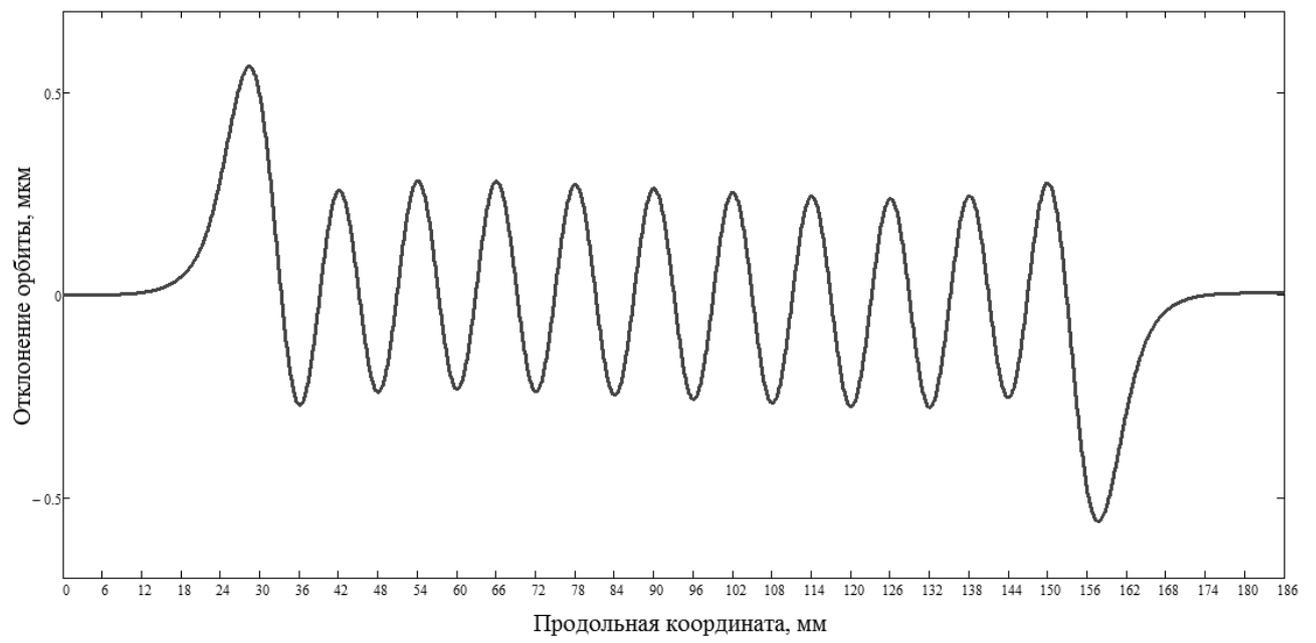
**Рис. 3**



**Рис. 4**



**Рис. 5**



**Рис. 6**

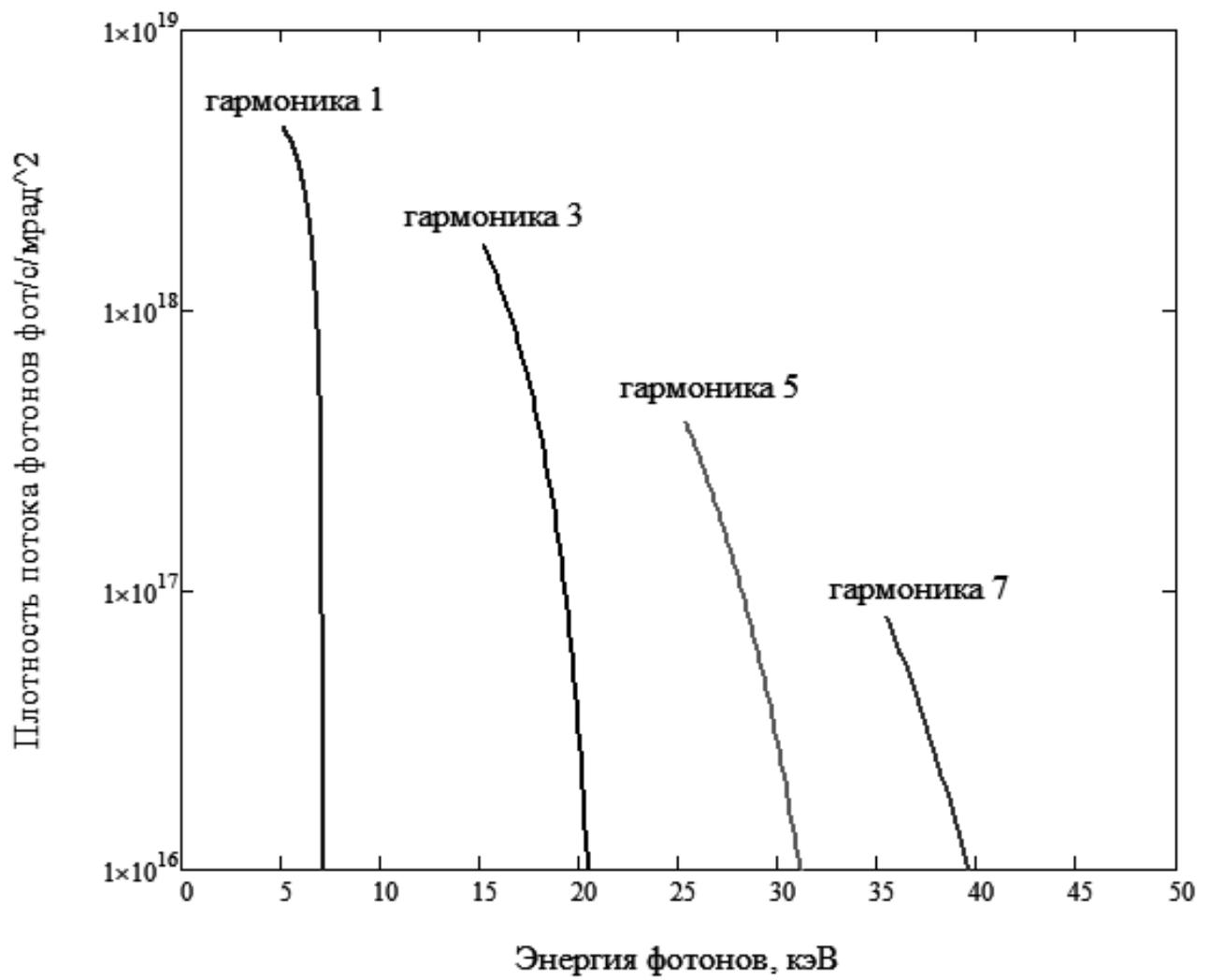


Рис. 7

Для связи с авторами:

Хрущев Сергей Владимирович

E-mail: [S.V.Khruschev@inp.nsk.su](mailto:S.V.Khruschev@inp.nsk.su)

Шкаруба Виталий

E-mail: [shkaruba@mail.ru](mailto:shkaruba@mail.ru)

Мезенцев Николай

E-mail: [N.A.Mezentsev@inp.nsk.su](mailto:N.A.Mezentsev@inp.nsk.su)

Сафронов Александр

E-mail: [A.N.Safronov@inp.nsk.su](mailto:A.N.Safronov@inp.nsk.su)

Цуканов Валерий

E-mail: [V.M.Tsukanov@inp.nsk.su](mailto:V.M.Tsukanov@inp.nsk.su)

~~Для переводчика:~~

~~**SUPERCONDUCTING UNDULATOR PROTOTYPE WITH 12 mm PERIOD AND  
0.7 T MAGNETIC FIELD.**~~

~~**Abstract** – A superconducting undulator prototype with 12 mm period and 0.7 Tesla magnetic field has been developed at the Institute of Nuclear Physics SB RAS. The vertical beam aperture is 5 mm, while the magnetic gap is 7 mm. The article justifies the choice of undulator parameters, describes its design, based on a horizontal racetrack with neutral poles, and provides the calculated characteristics of the undulator and the radiation generated by it.~~