ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА И ИНЖИНИРИНГ, 2022, том 13, № 5, с. 466–472

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.66

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛЕНОИДА ДЛЯ ФОКУСИРОВКИ ПУЧКА ЛЕГКИХ ИОНОВ

© 2022 г. И. В. Кильметова[a, b, *], А. В. Козлов[a], Т. В. Кулевой[a, b], Ю. Б. Стасевич[a], А. В. Зиятдинова[a], П. А. Федин[a], К. Е. Прянишников[a]

[a] *Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, 123182 Россия*

[b] *Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, Москва, 101000 Россия*

***E-mail: irina.kilmetova@yandex.ru*

Поступила в редакцию 28.06.2022 г.
После доработки 28.06.2022 г.
Принята к публикации 30.06.2022 г.

Ионный ускоритель – это многофункциональный инструмент, который может быть использован, в том числе, для моделирования эффектов нейтронного облучения реакторных материалов. В НИЦ "Курчатовский институт" – ИТЭФ ускоритель тяжелых ионов ТИПр (тяжело-ионный прототип) используется для моделирования радиационных повреждений в сталях и сплавах. Облучения ведутся в основном ионами железа Fe^{2+}, но при необходимости могут быть использованы и пучки ионов ванадия, тантала, углерода и многие другие. Для моделирования воздействия на реакторные конструкционные материалы продуктов ядерных реакций, необходимо в область создаваемых повреждений имплантировать водород и гелий. Для совершенствования экспериментов создается второй канал для одновременного облучения тяжелыми и легкими ионами. В работе рассматривается создание соленоида, используемого для фокусировки пучка ионов гелия из ЭЦР источника, и способ его электропитания.

Ключевые слова: соленоид, фокусировка, имитационный эксперимент, пучок ионов, ионный ускоритель

DOI: 10.56304/S2079562922030216

ВВЕДЕНИЕ

На ускорителе тяжелых ионов ТИПр (тяжелоионный прототип) [1] проводятся эксперименты для исследования радиационной стойкости конструкционных материалов, используемых при строительстве ядерных реакторов. В ходе экспериментов с целью имитации нейтронного воздействия, используются ускоренные ионные пучки химических элементов, входящих в состав материала образца, в частности, для облучения сталей используется пучок ионов Fe^{2+}. Ускоритель ТИПр работает в импульсном режиме. Период посылок – 2 с, длительность импульса пучка – 475 мкс. Ускорение пучка происходит в структуре с RFQ до 101 кэВ/нуклон (5.6 МэВ для ионов Fe^{2+}). Имитационные эксперименты по облучению материалов ускоренными пучками тяжелых ионов позволяют активировать каскадное рождение структурных дефектов, аналогичное тому, что происходит при реакторном облучении [2].

В реальных условиях нейтронного облучения в результате реакций ядерной трансмутации в материалах образуются газообразные примеси: водород и гелий, которые накапливаются одновременно с появлением радиационных дефектов [3]. Поэтому для полноты воспроизведения процессов, происходящих в материалах ядерных энергетических установок в условиях их эксплуатации, необходимо одновременное внедрение ионов водорода и гелия в область дефектообразования от основного пучка.

С этой целью в ИТЭФ разрабатывается канал второго ускоренного ионного пучка для одновременного облучения образцов пучками тяжелых и легких ионов (рис. 1). Второй канал расположен под углом 30° к существующему выходному каналу ускорителя ТИПр. Требуемая энергия имплантации для ионов He^+ варьируется от 150 до 300 кэВ, а для ионов H^+ – от 50 до 150 кэВ [4]. Для этого в качестве инжектора планируется использование высоковольтной платформы High Voltage platform с напряжением до 300 кВ. Для генерации пучка легких ионов предусмотрено использование ЭЦР источника ECR IS [5]. Для транспортировки пучка от ЭЦР источника к сепарирующему магниту BM используется соленоид Sol. Для транспортировки пучка без потерь в ускорительной трубке AT используется триплет квадрупольных линз LQ

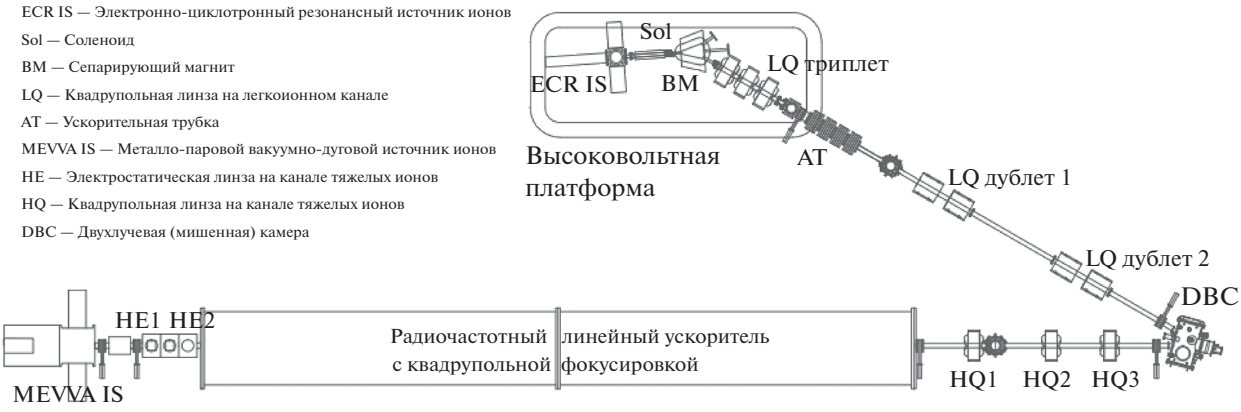

Рис. 1. Схема инжекционного комплекса на базе ускорителя ТИПр.

Triplet. Пучок, ускоряясь до необходимой энергии в AT, транспортируется через дублеты квадрупольных линз LQ Doublet 1, 2 и направляется в мишенную камеру DBC.

Целью данной работы является проектирование модели соленоида Sol и схемы его питания. Оно проведено на основе данных, полученных из расчета динамики пучка, представленных в табл. 1.

РАСЧЕТ ЧИСЛА АМПЕР ВИТКОВ СОЛЕНОИДА

С целью снижения погрешности совмещения магнитного поля соленоида с оптической осью фокусирующего канала, а также для максимально близкого расположения обмотки к оси ионопровода, была выбрана бескаркасная конструкция соленоида. Для этого разместим обмотку на отдельной, изолированной от нее апертурной трубке, изготовленной из нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной стенки 2.5 мм, которая будет пристыковываться к ионопроводу посредством торцевых фланцев. В расчетной модели магнитная апертура соленоида принята равной внешнему диаметру апертурной трубки $d_1 = 105$ мм.

Величина магнитной индукции B_z на оси тонкостенного соленоида конечной длины l может быть найдена из соотношения [6]:

$$B_z = \frac{\mu_0 IN}{2l}\left[\frac{z+\frac{l}{2}}{\sqrt{R^2+\left(z+\frac{l}{2}\right)^2}} - \frac{z-\frac{l}{2}}{\sqrt{R^2+\left(z-\frac{l}{2}\right)^2}}\right], \quad (1)$$

где отсчет по продольной координате z ведется от геометрического центра соленоида, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная, Гн/м ; I – ток в соленоиде, А; N – число витков; R – радиус намотки, м.

Полагая, что проводник диаметром $d_0 \ll R$ мотается виток к витку, имеем условие связи $l = Nd_0$.

Соотношение (1) позволяет вычислить величину индукции магнитного поля в центре соленоида и найти число ампер-витков IN, необходимое для получения заданного значения. Подставив в (1) числовые данные табл. 1, найдем число ампер-витков $IN = 129$ кА вит.

Таблица 1. Заданные параметры для расчета соленоида

Период повторений импульсов пучка T_0, с	1
Время пролета пучка t_0, мкс	475
Длина катушки l, мм	450
Индукция магнитного поля в центре соленоида B_z, Тл	0.35
Относительная нестабильность магнитного поля $\delta = \Delta B/B$	≤0.01
Диаметр пучковой апертуры d, мм	100
Допустимая рабочая температура при частоте 1 Гц $T_р$, °С	50

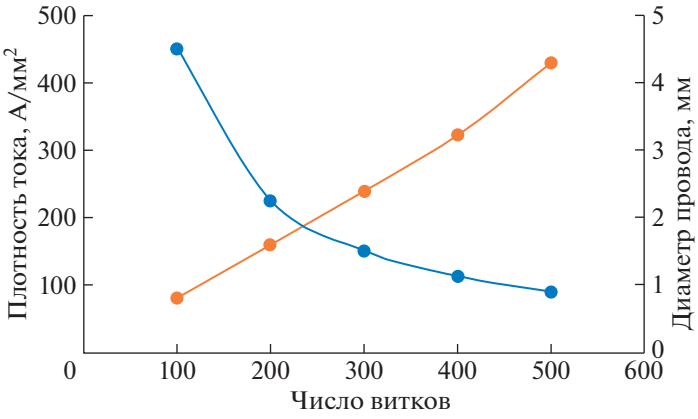

Рис. 2. Зависимости плотности тока и диаметра провода от числа витков.

РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОСТИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ СОЛЕНОИДА

Расчет сопротивления и индуктивности проводился для дальнейшего определения параметров разрядного контура импульсного питания. Для предварительного анализа и выбора основных параметров на основании полученного выше числа IN при заданной длине соленоида сопоставим число витков, плотность тока и сечения круглого проводника, необходимые для намотки однослойного соленоида. На рис. 2, представлены графики плотности тока и диаметра провода в зависимости от числа витков при фиксированной длине однослойного соленоида.

Анализ этих зависимостей показывает, что из-за большой плотности тока и чрезмерно высокой потребляемой мощности в таком соленоиде необходимо ввести импульсный режим питания. Однако даже ограничивая плотность тока допустимой величиной до 4 А/мм^2 (в среднем по импульсу), необходимо, кроме того, перейти к многослойной конструкции обмотки и тем самым увеличить ее сечение. Ниже приведены расчеты моделей соленоида с намоткой от двух до четырех слоев медным проводом двух типов: ПЭЛ-2 ∅2.5 мм и шиной ПБД 5 × 3 мм^2. Количество витков N_L в каждом слое обмотки с учетом коэффициента заполнения, равного 0.95, составило 166 и 76 витков в зависимости от марки провода, соответственно.

Активное сопротивление обмотки соленоида внутреннего радиуса R_i с числом слоев k можно получить из соотношения:

$$r = \frac{2\pi N_\text{L}\rho_\text{Cu}}{S}\sum_{n=1}^{k}\left[R_\text{i} + \frac{d_0}{2} + d_0(n-1)\right], \qquad (2)$$

где ρ_Cu – удельное электрическое сопротивление меди, S – сечение провода.

Полагая, что поле в продольном направлении изменяется в соответствии с выражением (1), определим индуктивность соленоида. Расчетная модель предполагает, что индукция магнитного поля в любом поперечном сечении соленоида $z = \text{const}$ совпадает с его значением на этой оси $B(r, z) = B(0, z)$, за пределами апертуры оно равно нулю, и каждый действительный слой заменен тонкостенным. Тогда суммирование магнитных потоков, сцепленных с каждым витком обмотки [7], дает следующее выражение для индуктивности:

$$L = \frac{\mu_0\pi R_\text{i}^2 N}{2l}\times$$
$$\times\sum_{m=1}^{k}\sum_{n=1}^{N_\text{L}}\left[\frac{z_n + \frac{l}{2}}{\sqrt{R_m^2 + \left(z_n + \frac{l}{2}\right)^2}} - \frac{z_n - \frac{l}{2}}{\sqrt{R_m^2 + \left(z_n - \frac{l}{2}\right)^2}}\right], \qquad (3)$$

где считается, что витки мотаются равномерно в k слоев по N_L витков в каждом, z_n–z – координата n-го витка, а R_m – радиус m-го витка намотки. Результаты расчета сопротивления (2) и индуктивности (3) для всех вариантов соленоида приведены в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные значения сопротивления и индуктивности для рассматриваемых вариантов соленоида

Параметры провода, мм	∅2.5			3 × 5		
Количество слоев k	2	3	4	2	3	4
Сопротивление обмотки r, мОм	390	610	850	65	100	140
Индуктивность L, мГн	2.4	5.3	9.4	0.5	1.1	2

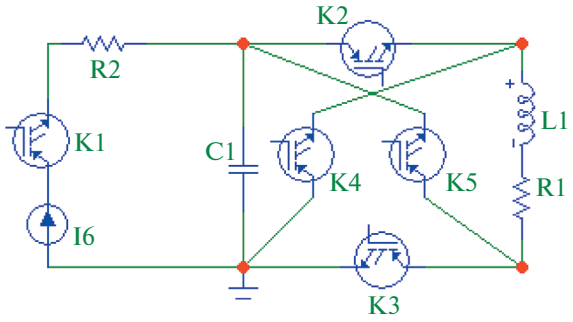

Рис. 3. Схема генератора импульсов тока соленоида, реализующая режим рекуперации.

РАСЧЕТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА

Питание соленоида осуществляется током резонансного разряда конденсатора в силовом колебательном контуре, в котором соленоид выполняет роль индуктивной нагрузки. Величина амплитуды синусоидального импульса тока должна обеспечивать заданное значение магнитной индукции на оси соленоида. Длительность импульса – $\tau_и$ (4), равная полупериоду колебаний в контуре, выбирается из условий обеспечения заданной относительной неравномерности тока δ в течение времени t_0 пролета пучка, центр которого должен совпадать по времени с прохождением тока соленоида через максимум.

$$\tau_и = \frac{T}{2} \simeq \frac{\pi t_0}{2\sqrt{2\delta}}. \qquad (4)$$

Подставив в (4) заданные числовые значения из табл. 1, получим $\tau_и = 5.3$ мс.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА

Поскольку для колебательного контура без потерь длительность периода $T = 2\pi\sqrt{LC}$, то с учетом соотношения (4) можно найти выражение для вычисления емкости конденсатора и затем величины зарядного напряжения U конденсатора (5), необходимой для получения в соленоиде импульса тока амплитудой I:

$$C = \frac{t_0^2}{8\delta L}, \quad U = I\rho, \qquad (5)$$

где $\rho = \sqrt{L/C}$ – волновое сопротивление контура.

Поскольку в силовых контурах питания рассматриваемых моделей соленоида добротность $Q \geq 0.5$, то происходит перезарядка силовых конденсаторов. Для устранения этого процесса и, как следствие, для снижения потребляемой мощности источника зарядного напряжения была рассмотрена и промоделирована схема генератора импульсного питания рекуперации энергии, накопленной в индуктивной нагрузке (рис. 3). Графики тока в нагрузке и напряжения на конденсаторе, полученные в пакете моделирования Micro-Cap [8], приведены на рис. 4.

Генератор содержит источник зарядного тока I6, LC-контур, зарядный ключ K1 и две пары ключей K2, K4 и K3, K5, включаемые попарно в противофазе.

При замыкании ключей K2 и K3 происходит нарастание тока соленоида до максимального значения и уменьшение напряжения на конден-

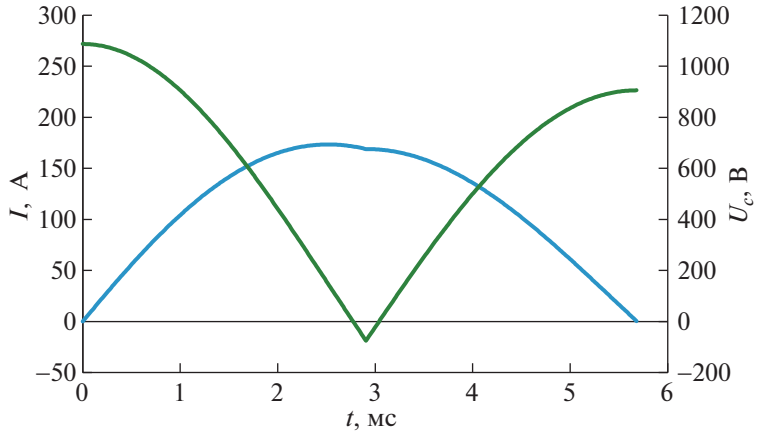

Рис. 4. Временные диаграммы изменения тока в соленоиде и напряжения на конденсаторе для четырехслойной намотки проводом ПЭЛ-2.

Таблица 3. Параметры обмотки и разрядного контура рассмотренных модификаций соленоида

	Для провода, мм					
	∅2.5			3 × 5		
Количество слоев k	2	3	4	2	3	4
Количество витков N	332	498	664	152	228	304
Индуктивность L, мГн	2.4	5.3	9.4	0.49	1.1	2
Сопротивление соленоида r, мОм	388	609	847	63	100	139
Емкость C, мФ	1.18	0.53	0.3	5.76	2.56	1.41
Волновое сопротивление ρ, Ом	1.43	3.16	5.6	0.3	0.66	1.2
Добротность контура Q	3.68	5.2	6.61	4.6	6.56	8.6
Амплитуда тока в соленоиде I, А	388	259	194	850	566	424
Максимальное напряжение на конденсаторе, В	555	817	1087	248	371	505
Зарядное сопротивление, Ом	208	490	913	45	109	206
Напряжение дозарядки конденсатора, В	243	275	319	128	111	115
Средняя мощность источника, Вт	155	115	100	163	97	79

саторе с переходом в область отрицательных значений. Ключи К4 и К5 замыкаются по окончании пролета пучка легких ионов, направление тока через конденсатор изменяется на обратное, и напряжение на нем восстанавливается в исходной полярности до значения $U_c(\tau_и)$. Параметры рассчитанных моделей соленоида, силового контура, величин импульсных токов и зарядных напряжений приведены в табл. 3.

Таблица 4. Максимальная температура нагрева соленоида

Марка провода	Количество слоев	$P_{ср}$, Вт	Установившаяся температура, °С
ПЭЛ-2	2	155	60
	3	108	48
	4	85	44
ПБД 5 × 3 мм^2	2	119	51
	3	85	41
	4	66	35

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА СОЛЕНОИДА

Для определения нагрева соленоида вычислялось усредненное значение тока по периоду следования импульсов пучка T_0 и мощность рассеяния:

$$I_{ср.д} = I\sqrt{\frac{\tau_и}{2T_0}};\quad P_{ср} = rI^2_{ср.д}.$$

Тепловой расчет проведен в пакете моделирования Comsol [9], Теплопроводность между слоями соответствует изолирующему материалу – лавсан, $\alpha = 0.14$ Вт/(м К) толщиной 0.1 мм, коэффициент теплоотдачи на границе обмотки с окружающей средой принят равным 15 Вт/(м^2 К). Моделирование динамики процесса нагрева проводилось для условий естественного конвективного теплообмена при температуре окружающей среды 20°С. При этом учтено, что со стороны внутренней поверхности соленоида теплообмен с внешней средой отсутствует.

Задача расчета состоит в определении рабочей температуры соленоида. Так в качестве примера на рис. 5 представлен график изменения температуры двухслойного соленоида, выполненного проводом ПЭЛ-2. Анализ показывает, что в этом случае примерно за 3 ч работы в номинальном ре-

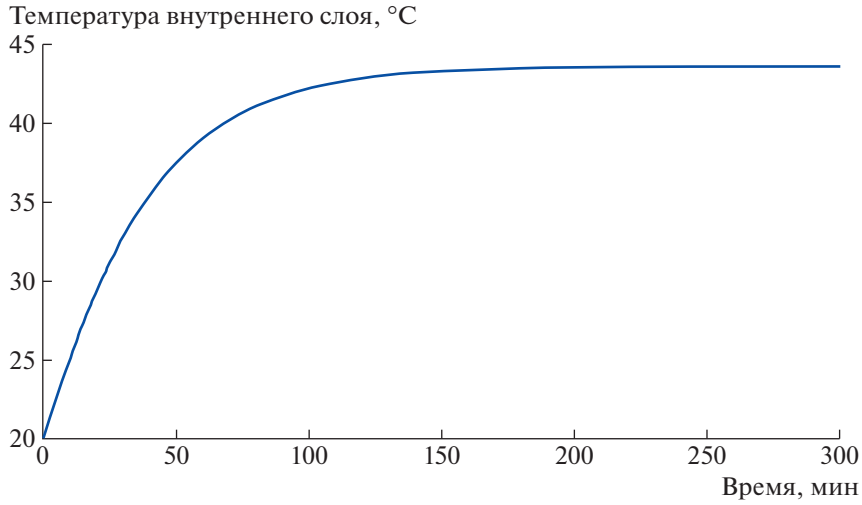

Рис. 5. Зависимость температуры в четырехслойном соленоиде (ПЭЛ-2) от времени.

жиме двухслойный соленоид нагревается до температуры, близкой к установившейся ≈44°C.

Для остальных моделей соленоида расчет установившейся температуры проводился аналогично. Величины средней мощности и установившихся температур для всех моделей соленоида приведены в табл. 4. По соображениям наименьшей рабочей температуры предпочтителен четырехслойный соленоид, выполненный проводом ПБД: его рабочая температура не выше 34°C. Двухслойные модели соленоида не удовлетворяют допуску $T_р$ на рабочую температуру (табл. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено моделирование соленоида для фокусировки пучка легких ионов и определение схемы генератора импульсного питания для заданных параметров магнитного поля и размеров рабочей области. Для этого рассчитаны необходимое количество ампер-витков и основные параметры обмотки соленоида, выбрана расчетная модель поля для вычисления индуктивности. Определены схема генератора, функционирующего в режиме рекуперации энергии, накопленной в индуктивной нагрузке, параметры колебательного контура и величина необходимой мощности источника питания. Расчеты выполнены для 6 вариантов соленоида: варьировалось количество слоев обмотки в диапазоне 2–4 и тип провода – ПЭЛ-2 и ПБД 5 × 3 мм^2. Для всех вариантов был проведен расчет температуры соленоида в установившемся режиме работы. На основании проведенных расчетов выбран наиболее эффективный вариант: 4-слойный соленоид с намоткой, выполненной проводом ПБД.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения №075-15-2021-1358 от 12 октября 2021г (ID RF–0951.61321X0015). В работе использовалось оборудование Центра коллективного пользования КАМИКС (https://ckp-rf.ru/ckp/502001/) НИЦ “Курчатовский институт”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Fedin P.A., Saratovskik M.S., Kuibeda R.P., Sitnikov A.L, Kulevoy T.V., Nikitin A.A., Rogozhkin S.V.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1115 (3). P. 032026.
2. *Nelson R.S., Mazey D.J., Hudson J.A.* // J. Nucl. Mater. 1970. V. 37. P. 1–12.
3. *Taller S., Woodley D., Getto E., Monterrosa A.M., Jiao Zh., Toader O., Naab F., Kubley Th., Dwaraknath Sh., Was G.S.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. 2017. V. 412. P. 1–10.
4. *Fedin P.A. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1686. P. 012073 https://doi.org/10.1088/1742-6596/1686/1/012073
5. *Селезнев Д.Н., Зарубин А.Б., Кузьмичев В.Г., Кулевой Т.В.* // ЭЦР-источник легких ионов. Сб. тр. VII Междунар. конф. “Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз 2021”. Москва, 2021.
6. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. 1986. Москва: Высшая школа.
7. *Савельев И.В.* Курс общей физики. Т. 2. Электричество. 1964. Москва: Наука.
8. *Micro-Cap*. http://www.spectrum-soft.com/index.shtm.
9. Comsol. https://www.comsol.ru/.

Designing a Solenoid for a Light Ion Beam Focusing

I. V. Kilmetova[1, 2, *], A. V. Kozlov[1], T. V. Kulevoy[1, 2], Yu. B. Stasevich[1], A. V. Ziiatdnova[1], P. A. Fedin[1], and K. E. Pyianishnikov[1]

[1] National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, 123182 Russia

[2] National Research University Higher School of Economics, Moscow, 101000 Russia

**e-mail: irina.kilmetova@yandex.ru*

Received June 28, 2022; revised June 28, 2022; accepted June 30, 2022

Abstract—Ion accelerator is multi-tool used for effects of neutron irradiation of reactor materials simulating. The heavy ion accelerator HIPr (Heavy Ion Prototype) is used for radiation damage in steels and alloys simulating at ITEP (National Research Centre "Kurchatov institute"). In the main irradiations is carried out with iron ions Fe^{2+} but, if necessary, vanadium, tantalum, carbon and many others ions beams can be used. It is necessary to implant hydrogen and helium into the area of damage for effect of nuclear reaction products on reactor structural materials simulating. The second channel is created for simultaneous irradiation with heavy and light ions for improving experiments. The paper considers the design of a solenoid which is used to focus a helium ion beam from ECR source and the method of its power supply.

Keywords: solenoid, focusing, irradiation experiment, ion beam, ion accelerator