

## ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ТОКОПЛАЗМЕННОЙ ОБОЛОЧКИ В КАМЕРАХ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА

© 2022 г. Д. И. Юрков<sup>1,2</sup>, В. А. Лавренин<sup>2</sup>, Б. Д. Лемешко<sup>1,2</sup>, А. Н. Селифанов<sup>1</sup>, А. К. Дулатов<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>ФГУП ВНИИ автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, 127030, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, 115409, Россия

\*e-mail: akdulatov@vniiia.ru

Поступила в редакцию 01.10.2022 г.

После доработки 03.10.2022 г.

Принята к публикации 04.10.2022 г.

В работе проведена верификация математического моделирования движения токоплазменной оболочки в камерах плазменного фокуса, осуществляющегося программой “Двумерный МГД-код для расчета плазменного фокуса”. Описан принцип работы генераторов импульсного нейтронного излучения на базе камер плазменного фокуса и приведены основные магнитогидродинамические уравнения, описывающие поведение полностью ионизованной плазмы, лежащие в основе МГД-кода. В МГД-коде моделирование движения токоплазменной оболочки проводится в рамках идеальной одножидкостной двумерной магнитной гидродинамики в предположении осесимметричного развития разряда. Верификация МГД-кода проведена путем сравнения результатов расчета с экспериментальными данными для камер плазменного фокуса ПФ7-02, Т19-Л316 и ПФ7-02М1, выпускаемых ВНИИА. Приведено сравнение расчетных и экспериментальных значений амплитуды разрядного тока, времени достижения максимума тока и времени особенности (время пинчевания), показан интерфейс программы. Показаны экспериментальная и расчетная зависимости амплитуды разрядного тока от зарядного напряжения для камеры Т19-Л316 в диапазоне напряжений от 17 до 23 кВ и токов от 150 до 200 кА. Сделано заключение о перспективности использования данной программы при разработке генераторов на камерах плазменного фокуса.

**Ключевые слова:** плазменный фокус, генератор нейтронов, токоплазменная оболочка, пинч

**DOI:** 10.56304/S2304487X22030129

Плазменный фокус представляет собой нецилиндрический Z-пинч – явление сжатия плазмы магнитным полем в сильноточном электрическом разряде, которое имеет место в газоразрядных камерах со специальной конструкцией электродов. Установки, использующие явление плазменного фокуса, являются источниками нейтронов высокой интенсивности, которые образуются в результате реакции синтеза при наполнении камер дейтерием или смесью дейтерия с тритием [1, 2].

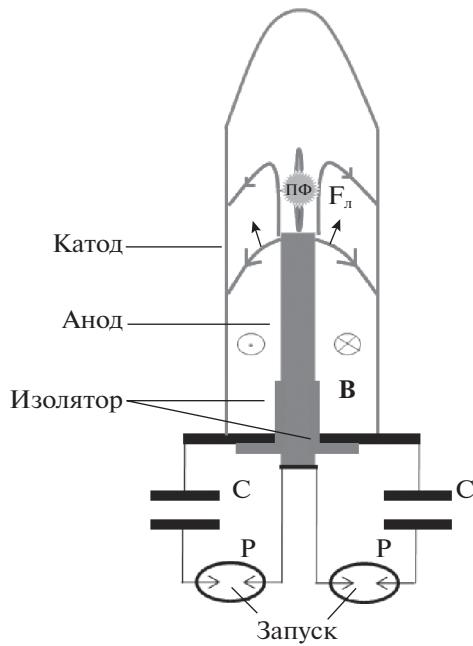
Принципиальная схема генераторов нейтронов на камерах плазменного фокуса представлена на рис. 1. Емкостные накопители энергии С заряжаются до рабочего напряжения  $U_0$ , и при срабатывании коммутаторов  $P$  происходит пробой по поверхности изолятора. На начальной стадии развития разряда происходит скинирование тока вдоль изолятора и формируется токоплазменная оболочка (ТПО) [3]. Образовавшаяся ТПО под действием пондеромоторных сил отрывается от изолятора и начинает движение вдоль поверхности электродов. В результате радиального сжатия оболочки (пинчевания) вблизи конца анода обра-

зуется плазменный фокус (ПФ), генерирующий рентгеновское и нейтронное излучения [4].

Пинчевание сопровождается возникновением на осцилограммах разрядного тока или производной разрядного тока так называемой особенности (рис. 2). Время особенности  $\tau_{oc}$  определяется размерами электродов, давлением и типом заполняемого газа, электротехническими параметрами источника питания.

Для эффективной работы камеры ПФ должно выполняться условие согласования камеры ПФ с разрядным контуром: достижение максимума разрядного тока одновременно с моментом начала радиального сжатия ТПО [5].

Вопрос согласования решается с помощью математического моделирования процессов, происходящих в установках плазменного фокуса, и экспериментальным способом [6]. Для нахождения согласованного режима работы камеры ПФ и генераторов импульсного тока, разрабатываемых во ВНИИА им. Н.Л. Духова [7], была разработана совместно с сотрудниками Курчатовского инсти-



**Рис. 1.** Включение камеры плазменного фокуса в схему электропитания: Р – коммутаторы; С – конденсаторная батарея; ПФ – плазменный фокус.

тута программа “Двумерный МГД-код для расчета плазменного фокуса” (далее кратко “МГД-код”). Правообладателем является ВНИИА [8].

В данной программе моделирование ТПО проводится в рамках идеальной одножидкостной

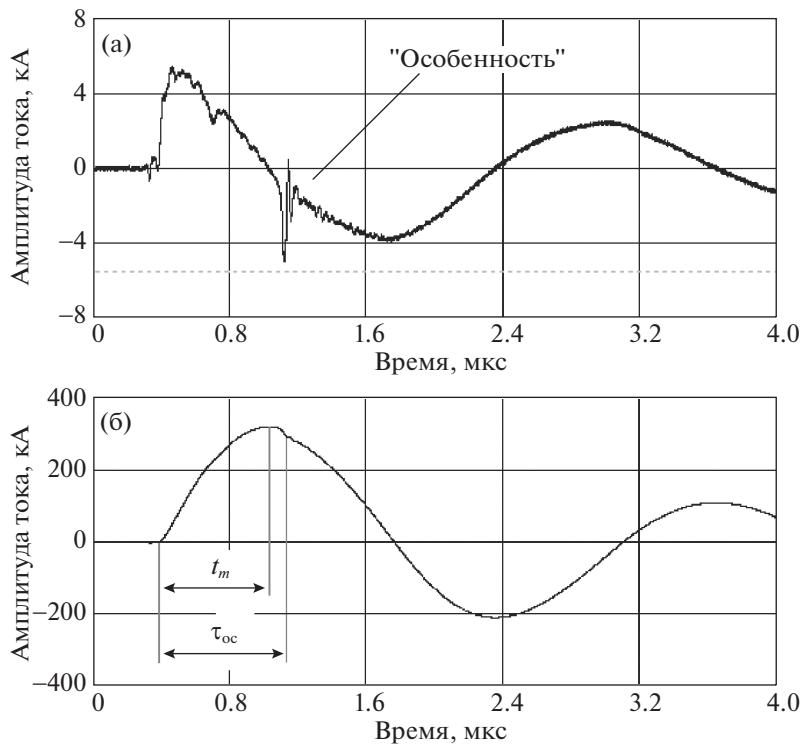
двумерной магнитной гидродинамики в предположении осесимметричного развития разряда.

Для моделирования процесса развития разряда в камере плазменного фокуса используются следующие МГД-уравнения, описывающие поведение полностью ионизованной плазмы с  $T_e = T_i = T$  [9]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} + \operatorname{div}(n\mathbf{V}) &= 0, \\ \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \operatorname{rot}[\mathbf{V}, \mathbf{B}] &= 0, \\ \frac{\partial n V_{r,z}}{\partial t} + \operatorname{div}(n V_{r,z} \mathbf{V}) &= \\ = -\frac{2}{m_i} \operatorname{grad}(n T)_{r,z} + \frac{1}{4\pi m_i} [\operatorname{rot}(\mathbf{B}, \mathbf{B})]_{r,z}, \\ \frac{3}{2} \left( \frac{\partial n T}{\partial t} + \operatorname{div}(n T \{\mathbf{V}\}) \right) &= -n T \operatorname{div}(\mathbf{V}), \end{aligned}$$

где  $n$  – ионная плотность плазмы;  $\mathbf{V}$  – скорость плазмы, имеющая осевую и радиальную компоненты  $V_z$  и  $V_r$ ;  $\mathbf{B}$  – напряженность магнитного поля, имеющая только азимутальную компоненту  $B_\phi$ ;  $t$  – время;  $r$  и  $z$  – радиальная и осевая координаты;  $T$  – температура плазмы,  $m_i$  – масса иона.

Данная система замыкается уравнениями электрической цепи и граничными условиями: равенством нулю скорости, температуры и плотности плазмы на стенках, равенством нулю маг-



**Рис. 2.** Оциллограмма производной тока (а) и восстановленный сигнал тока (б).

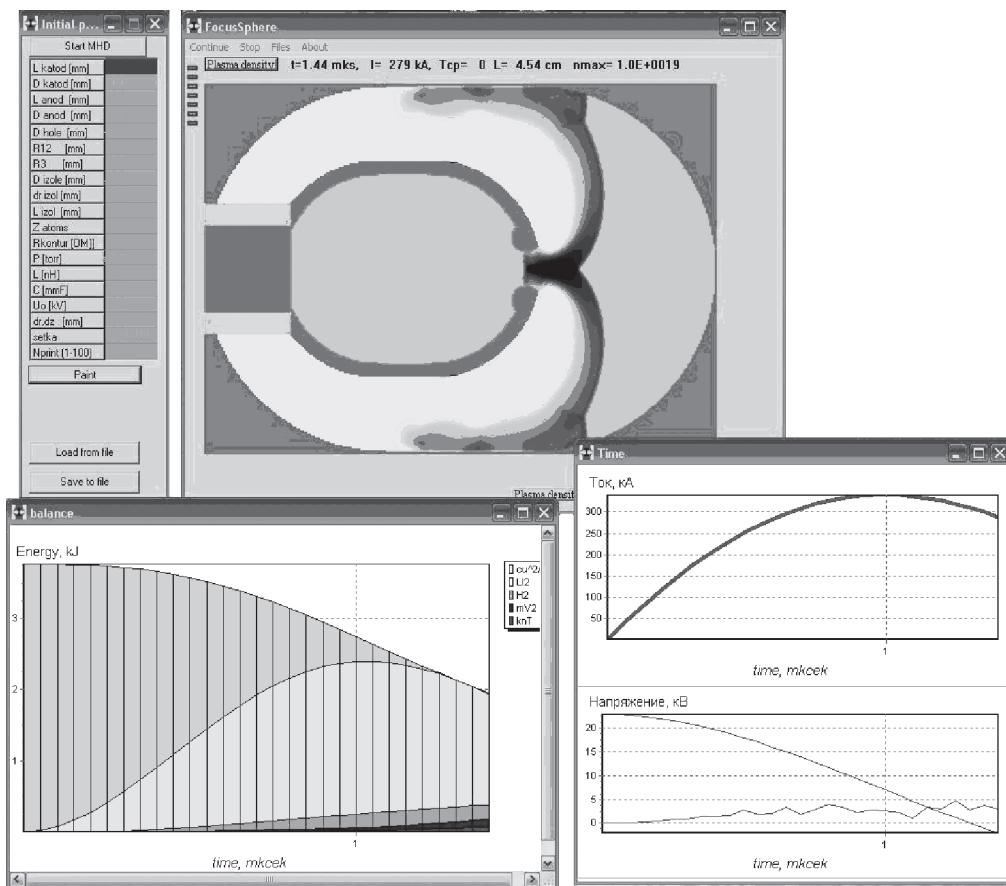


Рис. 3. Интерфейс программы “Двумерный МГД-код для расчета плазменного фокуса”.

нитного поля на электродах, равенством магнитного поля на изоляторе величине  $\mu_0 I / 2\pi r_{\text{изол}}$ , где  $I$  — ток в электрической цепи,  $r_{\text{изол}}$  — радиус изолятора.

Решение находится численно при помощи полностью явной разностной схемы.

Интерфейс программы “МГД-код” представлен на рис. 3. Программа моделирует все стадии развития разряда, начиная с момента отрыва ТПО от изолятора. При этом отслеживается энергетический баланс и кривые разрядного тока и напряжения.

Программа позволяет рассчитывать такие параметры плазмы, как плотность и температура плазмы, азимутальная составляющая напряжен-

ности магнитного поля, радиальная и z-составляющие скорости плазмы и плотность тока.

С целью проверки точности расчетов “МГД-код”, касающихся вопроса согласования работы камеры с разрядным контуром, была проведена верификация программы путем сравнения расчетных значений параметров с теми, которые реально наблюдаются в условиях эксперимента. Это максимальное значение тока в контуре, время достижения максимального значения и время особенности.

Верификация была проведена для камер, выпускаемых производством ВНИИА: ПФ7-02, Т19-Л316, ПФ7-02М1. Данные конструкции камер отличаются внутренней геометрией [10] и согласованы с различными разрядными контурами (таблица 1).

Таблица 1. Основные характеристики камер ПФ

Тип камеры	Наполнение	Давление, Тор	Диаметр катода, мм	Длина анода, мм	Параметры разрядного контура		
					C, мкФ	L <sub>КОНТ</sub> , нГн	R <sub>КОНТ</sub> , мОм
ПФ7-02	D-D	14	50	45	14.2	37	12
Т19-Л316	D-T	15	40	18	4.4	35	24
ПФ7-02М1	D-T	15	50	30	9.1	37	16

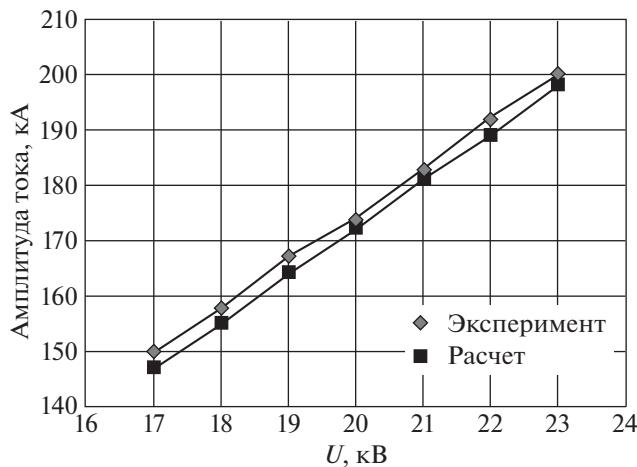


Рис. 4. Графики зависимостей амплитуды разрядного тока от зарядного напряжения для камеры Т19-Л316.

Было проведено сравнение экспериментальных и расчетных значений амплитуды разрядного тока при различном зарядном напряжении. На рис. 4 представлены результаты сравнения для камеры Т19-Л316. Как видно из рисунка, совпаде-

ние расчетов с экспериментальными данными достаточно хорошее: расхождение составляет не более 2%.

На рис. 5 показано, что для камеры типа ПФ7-02 расчетное время особенности очень близко к экспериментальному: 1.18 мкс и 1.19 мкс соответственно. Расхождение составляет 1%.

В таблице 2 представлены сводные результаты верификации для всех трех рассмотренных конструкций камер, соответствующие рабочему напряжению  $U_0 = 23$  кВ. Для всех камер расхождения экспериментальных значений и значений, рассчитанных программой “МГД-код”, составило не более 12%.

По результатам верификации программы “Двумерный МГД-код для расчета плазменного фокуса” можно сделать вывод о хорошем совпадении результатов расчета с экспериментальными данными для камер ПФ, изготовленных во ВНИИА, а также о возможности использования данной программы для решения вопроса согласования при разработке новых камер ПФ и соответствующих им генераторов импульсного тока.

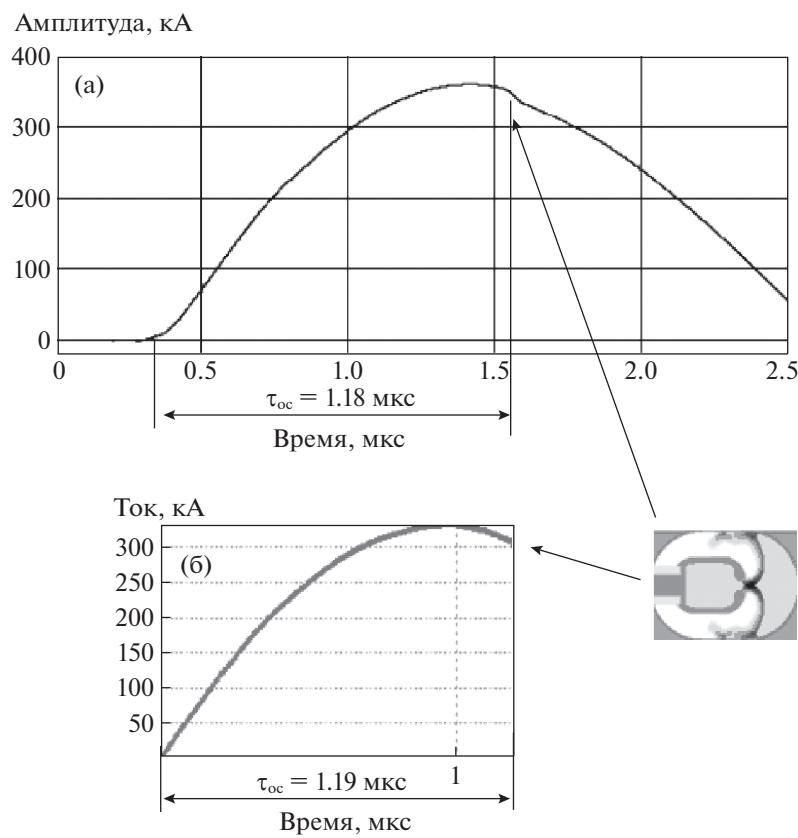


Рис. 5. Экспериментальное (а) и расчетное время особенности (б) для камеры ПФ7-02.

**Таблица 2.** Результаты верификации программы на экспериментальных данных

Тип камеры	$U_0$ , кВ	Im , кА			tm, мкс			toc, мкс		
		Эксп.	Расч.	δ, %	Эксп.	Расч.	δ, %	Эксп.	Расч.	δ, %
ПФ7-02	23	350	338	3	1.17	1.04	12	1.18	1.19	1
Т19-Л316	23	200	202	1	0.66	0.60	9	0.76	0.83	6
ПФ7-02М1	23	290	279	4	0.97	0.86	11	1.15	1.26	10

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Верификация описанного в статье МГД-кода для расчета плазменного фокуса показала хорошее совпадение экспериментальных и расчетных результатов для камер плазменного фокуса, производства ВНИИА, типа ПФ7-02, Т19-Л316 и ПФ7-02М1. Расхождение значений амплитуды разрядного тока  $I_m$  не превышало 4%, расхождение значений достижения током амплитудного значения  $t_m$  не превышало 12%, а расхождение значений времен особенности  $t_{oc}$  не превышало 10%.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность Вихреву В.В. (НИЦ “Курчатовский институт”) за разработку магнитогидродинамической модели и участии в верификации программы “Двумерный МГД-код для расчета плазменного фокуса”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Филиппов Н.В., Филиппова Т.И., Петров Д.П., Храбров В.А. // Физика плазмы и проблемы управляемых термоядерных реакций. М.: АН СССР, 1958. Т. 4. С. 170–181.
- Scholz M. Plasma-focus and Controlled Nuclear Fusion. The Henryk Nejwodniczanski Institute of Nuclear Physics. Poland, 2014.
- Haines M.G. A review of the dense Z-pinch // Plasma Phys. Control. Fusion, 2011. V. 53. № 093001. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/53/9/093001>
- Матвеев Ю.В. Генерация жестких излучений и динамика плазмы в опытах с цилиндрическими z-пинчами // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 2. С. 1–16.
- Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Том IX-2. Высокоэнергетическая плазмодинамика. Отв. редактор А.С. Кингсепп. М.: Янус-К, 2007. С. 155–158.
- Lee S., Saw S.H. Numerical experiments providing new insights into plasma focus fusion devices // Energies. 2010. V. 3. P. 711–737. <https://doi.org/10.3390/en3040711>
- Нейтронные генераторы [Электронный ресурс]. М.: ВНИИА. URL <http://vniiia.ru/production/neitronnie-generatory/neytroynnye-generatory.php> (дата обращения 10.09.2022)
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616791.
- Вихрев В.В., Иванов В.В., Розанова Г.А. Развитие петяжек при наличии коротковолнового возмущения границы z-пинча // Физика плазмы. 1989. Т. 15. Вып. 1. С. 77.
- Yurkov D.I., Dualtov A.K., Lemeshko B.D., Golikov A.V., Andreev D.A., Mikhailov Yu.V., Pokuratov I.A., Selifanov A.N. Pulsed neutron generators based on the sealed chambers of plasma focus design with D and DT fillings // Journal of Physics, Conference Series, 2015. V. 653. № 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/653/1/012019>

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta "MIFI", 2022, vol. 11, no. 3, pp. 260–265

## Verification of a Computational Model of Plasma-Current Sheath Motion in Plasma Focus Chambers

D. I. Yurkova<sup>a,b</sup>, V. A. Lavrenin<sup>b</sup>, B. D. Lemeshko<sup>a,b</sup>, A. N. Selifanov<sup>a</sup>, and A. K. Dulatov<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Duknov All-Russia Research Institute of Automatics (VNIIA), Moscow, 127030, Russia

<sup>b</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

\*e-mail: akdulatov@vniiia.ru

Received October 1, 2022; revised October 3, 2022; accepted October 4, 2022

**Abstract**—The mathematical modeling of plasma-current sheath (PCS) motion in plasma focus chambers has been verified with the two-dimensional magnetohydrodynamic (MHD) code for plasma focus calculating. The operation of pulsed neutron generators based on plasma focus chambers is described. The basic

MHD equations describing the behavior of a fully ionized plasma, underlying the MHD code, are also given. In the MHD code, plasma-current sheath motion is simulated in the framework of ideal one-fluid two-dimensional magnetohydrodynamics under the assumption of axisymmetric discharge development. The MHD code has been verified by comparing the calculation results with experimental data for plasma focus chambers ПФ7-02, Т19-Л316 and ПФ7-02М1 manufactured at VNIIA. The calculated values of the discharge current amplitude, the time to reach the current maximum, and the singularity time (pinching time) are compared with the respective experimental data. The program interface is shown. The experimental and calculated dependences of the discharge current amplitude on the charging voltage for the Т19-Л316 chamber are shown in the voltage range from 17 to 23 kV and currents from 150 to 200 kA. It has been concluded that this program is promising for the development of generators based on plasma-focus chambers.

*Keywords:* plasma focus, neutron generator, plasma-current sheath, pinch

DOI: 10.56304/S2304487X22030129

## REFERENCES

1. Filippov N.V., Filippova T.I., Petrov D.P., Hrabrov V.A. *Plasma Physics and Problems of Controlling Thermonuclear Reactions*. Moscow: USSR Academy of Science, 1958, no. 4. pp. 170–181. (in Russian)
2. Scholz M. *Plasma-focus and Controlled Nuclear Fusion*. The Henryk Neiwodniczanski Institute of Nuclear Physics. Poland, 2014.
3. Haines M.G. A review of the dense Z-pinch. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2011, vol. 53, no. 093001. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/53/9/093001>
4. Matveev V.V. Generaciya zhestkikh izlucheniya i dinamika plazmy v optyatah s cilindricheskimi z-pinchami. [Plasma dynamics and generation of hard radiations in experiments with cylindrical z-pinches]. *Plasma Physics Reports*, 2010, vol. 36, no. 3, pp. 200–215. (in Russian)
5. *Encyclopedia of Low Temperature Plasma* [ Encyclopedia of low-temperature plasma]. Ser B. vol. IX-2. High-energy plasmodynamics. Editor A.S. Kingsepp. Moscow. Yanus-K Publ., 2007, pp. 155–158. (in Russian)
6. Lee S., Saw S.H. Numerical experiments providing new insights into plasma focus fusion devices // Energies, 2010, vol. 3, pp. 711–737. <https://doi.org/10.3390/en3040711>
7. *Nejtronnye generatory* [Neutron generators]. Moscow: VNIIA. URL. Available at: <http://vniiia.ru/production/neitronnie-generatory/nejtronnye-generatory.php> (accessed 10.09.2022)
8. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2011616791*. [Certificate of state registration of the computer program № 2011616791]. (in Russian)
9. Vikhrev V.V., Ivanov V.V., Rozanova G.A. Razvitiye peretyazhek pri nalichii korotkovolnovogo vozmushcheniya granicy z-pincha. [Development of waists in the presence of a short-wavelength perturbation of the z-pinch boundary]. *Physica Plazmi*, 1989, vol. 15, no. 1, pp. 77. (in Russian)
10. Yurkov D.I., Dulatov A.K., Lemeshko B.D., Golikov A.V., Andreev D.A., Mikhailov Yu.V., Prokuratorov I.A., Selifanov A.N. Pulsed neutron generators based on the sealed chambers of plasma focus design with D and DT fillings. *Journal of Physics, Conference Series*, 2015, vol. 653, no. 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/653/1/012019>