

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

DOI 10.17816/transsyst687274

© Д.А. Александров, И.В. Мартиросян, Е.А. Веницкий,

М.А. Осипов, С.В. Покровский

Национальный Исследовательский Ядерный Университет

(Москва, Россия)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ КАТУШЕК ТОРОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ ТОКАМАКА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА

Цель. Определение рабочих параметров системы тороидального магнитного поля (рабочая температура, количество CORC-кабелей, величина транспортного тока) сверхпроводящего токамака MEPhIST-1.

Материалы и методы. Численный расчет тороидального магнитного поля токамака выполнен в среде моделирования COMSOL Multiphysics.

Результаты. Получены распределения магнитного поля для различных значений транспортного тока, протекающего через катушку токамака. Определены коэффициенты пропорциональности между максимальным магнитным полем на катушке и транспортным током, рабочим магнитным полем и рабочим транспортным током.

Заключение. Определено число CORC-кабелей для достижения рабочей величины индукции магнитного поля в 1 Тл: 7 при температуре в 37,6 К и 6 при температуре в 33,6 К. Показано, что возможно достижение значений рабочего поля порядка 1,5 Тл на 7 CORC-кабелях при понижении температуры до 21,1 К.

Ключевые слова: ВТСП композиты; численное моделирование; токамак; CORC-кабель.

Как цитировать:

Александров Д.А., Мартиросян И.В., Веницкий Е.А., Осипов М.А., Покровский С.В. Определение рабочих параметров катушек тороидального поля токамака на основе высокотемпературного сверхпроводника // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 3. С. 409–421. doi: 10.17816/transsyst687274

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrotechnology and Electrophysics

© D.A. Aleksandrov, I.V. Martirosian, E.A. Vinitskiy, M.A. Osipov,
S.V. PokrovskiiNational research nuclear university
(Moscow, Russia)**DETERMINING THE OPERATING PARAMETERS
OF TOROIDAL FIELD COILS OF TOKAMAK BASED
ON HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR**

AIM: The work aimed to determine the operating parameters of the toroidal magnetic field system (operating temperature, number of CORC cables, and transport current) of the MEPhIST-1 superconducting tokamak.

METHODS: Numerical calculation of the toroidal magnetic field of the tokamak was performed in the COMSOL Multiphysics modeling environment.

RESULTS: Magnetic field distributions for different transport currents flowing through the tokamak coil were obtained. The study determined proportionality constants for the strongest magnetic field on the coil and the transport current, the operating magnetic field and the operating transport current.

CONCLUSION: The study determined the number of CORC cables required to achieve the operating induction of 1 T (7 at a temperature of 37.6 K and 6 at a temperature of 33.6 K). The study showed that it is possible to achieve operating field values of about 1.5 T using 7 CORC cables by reducing the temperature to 21.1 K.

Keywords: HTS composites; numerical simulation; tokamak; CORC cable.

To cite this paper:

Aleksandrov DA, Martirosian IV, Vinitskiy EA, Osipov MA, Pokrovskii SV. Determining the operating parameters of toroidal field coils of tokamak based on high-temperature superconductor. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(3):409–421. doi: 10.17816/transsyst687274

ВВЕДЕНИЕ

В условиях растущего энергетического спроса и необходимости снижения антропогенного воздействия на климат планеты, особое внимание уделяется разработке экологически чистых и высокоэффективных источников энергии. Термоядерный синтез представляет собой один из наиболее перспективных вариантов долгосрочного энергоснабжения, способных обеспечить как энергетическую безопасность, так и минимальное воздействие на окружающую среду. Термоядерные источники энергии потенциально могут стать основным источником энергии электрического транспорта будущего – от электромобилей до высокоскоростных поездов и авиации [1, 2].

Система тороидального магнитного поля по-прежнему остается неотъемлемой частью установок термоядерного синтеза, отвечая за генерацию магнитного поля, необходимого для обеспечения стабильности и формирования плазмы. По мере наращивания усилий по реализации практического использования энергии термоядерного синтеза, были предприняты значительные шаги в разработке сверхпроводящих систем тороидального поля. В последнее время крупномасштабные токамаки с низкотемпературными сверхпроводниками (НТСП), такие как EAST [3] и KSTAR [4], показали возможность работы в режиме длительных импульсов и высокой производительности плазмы. В настоящее время концептуальные компактные токамаки, такие как SPARC, способствуют росту интереса к конструкциям с высоким магнитным полем, которые стали возможными благодаря высокотемпературным сверхпроводникам (ВТСП) [5]. Переход от НТСП к ВТСП, является важным шагом в достижении более высоких рабочих полей и улучшении тепловой стабильности. Такие исследования, как работа [6], подчеркнули превосходство ВТСП лент в сильных магнитных полях. Так называемые CORC-кабели (от coated conductor on round core – покрытая проводящая лента на круглой жиле), состоящие из спирально намотанных ВТСП лент, стали перспективными кандидатами для тороидальных магнитных систем, используемых в термоядерных реакторах, благодаря своей механической прочности и простоте намотки в сложные геометрические формы. В частности, ленты SuperOx 12 мм REBCO, характеризующиеся высокими критическими характеристиками (критический ток превышает 500 А при 20 Т и 4,2 К), были тщательно охарактеризованы и приняты в экспериментальных и концептуальных магнитных системах [7].

Целью настоящей работы является определение рабочих параметров системы тороидального магнитного поля (рабочая температура, количество CORC-кабелей, величина транспортного тока) сверхпроводящего токамака MEPhIST-1 для достижения величины индукции магнитного поля в рабочей зоне в 1 Тл. Повышение тороидального магнитного поля в токамаке способствует улучшению удержания и увеличению плотности термоядерной мощности $P_{fus} \sim B^4$ [8]. Помимо этого, увеличение тороидального поля приводит к повышению устойчивости плазмы к различным возмущениям [9]. В настоящей работе рассмотрена непрерывная конфигурация катушки тороидального поля.

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТОРОИДАЛЬНОЙ КАТУШКИ

В настоящее время ведется проектирование токамака MEPhIST-1 – усовершенствованной версии установки MEPhIST-0 [10]. Одной из ключевых задач при разработке является создание системы тороидального магнитного поля (СТМП). По аналогии с токамаком MEPhIST-0 для MEPhIST-1 было принято решение использовать катушку в виде неразрывного тороидального соленоида [11, 12], в котором один виток на внутреннем обходе плавно переходит в следующий. В качестве поперечного (полоидального) сечения катушки выбрано классическое оптимальное D-образное сечение [13, 14], обеспечивающее как высокую механическую прочность, так и эффективное накопление магнитной

энергии. Полоидальное сечение тороидальной катушки представлено на Рис. 1а. Угол поворота тороидальной катушки был рассчитан из условия минимизации вертикальных и радиальных компонентов магнитного поля, препятствующих формированию и удержанию плазменного шнура. На Рис. 1b показана линия тока для выбранного полоидального сечения катушки токамака МЕРPhIST-1. Метод расчета формы тороидальной катушки подробно изложен в работе [15].

Внешний вид предполагаемой криомагнитной системы тороидального поля токамака представлен на Рис. 2. В качестве основного токнесущего элемента предлагается использование CORC-кабеля. Подробно конструкция кабеля описана, например, в работе [16]. Рассмотрен вариант исполнения кабеля из 50 ВТСП-лент шириной 4 мм, намотанных на полую мельхиоровую трубку, внутри которой осуществляется прокачка жидкого хладагента для охлаждения сверхпроводника до рабочих температур. Внешний диаметр одного кабеля составляет 10,6 мм. Основным фактором, определяющим максимальное количество CORC-кабелей в одной катушке, является тот факт, что пространство между индуктором и внутренней камерой токамака ограничено. С учетом этих ограничений, максимально возможное количество CORC-кабелей – 7 штук (Рис. 2).

ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Расчет тороидального магнитного поля токамака выполнен с использованием метода конечных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysics. Расчет выполняется с использованием Н-формулировки нестационарных уравнений

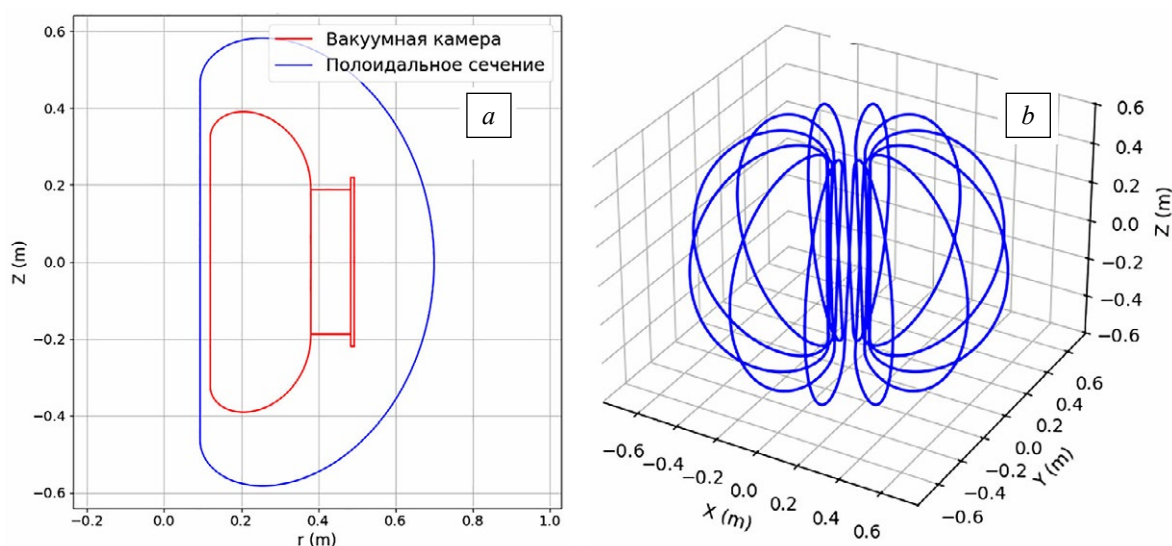


Рис. 1. (a) – Полоидальное сечение тороидальной катушки для токамака МИФИСТ-1, внутренний радиус $R_1 = 93$ мм, внешний радиус $R_2 = 0,7$ м; (b) – линия тока для тороидального неразрывного соленоида для токамака МИФИСТ-1

Fig. 1. (a) – Cross section of the toroidal coil for the MIFIST-1 tokamak, inner radius = 93 mm, outer radius = 0.7 m; (b) – Current line for the toroidal continuous solenoid for the MIFIST-1 tokamak

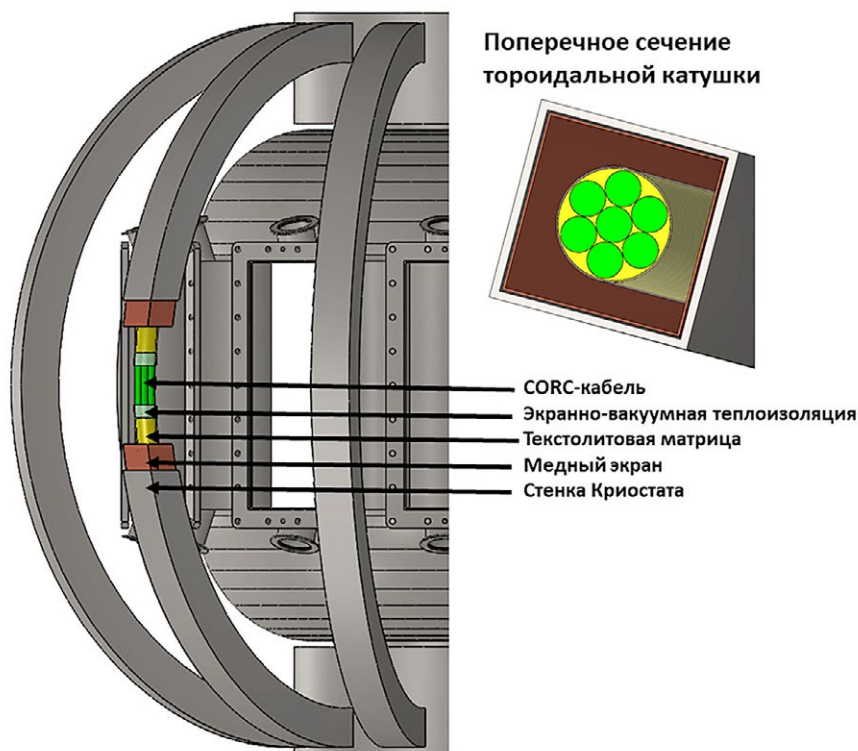


Рис. 2. Внешний вид криомагнитной системы тороидального поля токамака

Fig. 2. External view of the cryomagnetic system of the toroidal magnetic field of the tokamak

Максвелла. Разработанная модель ранее применялась для численного анализа индуктивного накопителя энергии основе ВТСП лент, подробное описание численной модели приведено в работе [17]. Вольтамперная характеристика сверхпроводника задается в виде степенного закона для нелинейной зависимости сопротивления от плотности тока:

$$\rho = \frac{E_c}{J_c} \left(\frac{|J|}{J_c} \right)^n, \quad (1)$$

где E_c – критерий, принятый равным 1 мкВ/см, J_c – критическая плотность тока, n – показатель степени, характеризующий крутизну ВАХ сверхпроводника.

Плотность тока J в сверхпроводнике определяется на основе решения нестационарных уравнений Максвелла, а критическая плотность тока J_c зависит от величины магнитного поля B и температуры T , как:

$$J_c(B, T) = L(B, T) \cdot J_{c0}, \quad (2)$$

где $L(B, T)$ – лифт-фактор критического тока, J_{c0} – критическая плотность тока ВТСП лент в собственном поле при температуре кипения жидкого азота 77,4 К.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения рабочих параметров токамака была проведена оценка максимального рабочего поля токамака в рабочей точке – 0,25 м от оси симметрии токамака. Расчеты были проведены для температур в диапазоне 10-77,5 градусов Кельвина, для различного числа CORC-кабелей (от 1-го до 7-ми). При расчетах использовались данные по критическим характеристикам ВТСП-ленты производства компании С-Инновации [7]. По полученным данным была вычислена зависимость лифт-фактора $L_q(B, T)$ от температуры и приложенного магнитного поля, которая показывает отношение критического тока ленты при заданных значениях магнитного поля и температуры к критическому току в нулевом внешнем магнитном поле при температуре кипения жидкого азота. Следует отметить, что в работе представлены только данные от 15 до 80 К и в полях до 8 Тл, поэтому данные вне этого диапазона были получены при помощи интерполяции и имеют низкую точность.

По полученным данным для разного числа CORC-кабелей в катушке (т.е. для 3, 4, 5, 6, 7) были рассчитаны зависимости максимального транспортного тока через сборку CORC-кабелей от поля для различных температур. Максимальный транспортный ток через сборку, рассчитывался согласно выражению (3):

$$I_c(B, T) = L_q(B, T) \cdot N \cdot N2 \cdot I_{0c}, \quad (3)$$

где $L_q(B, T)$ – лифт фактор, N – число CORC-кабелей, $N2$ – число лент в одном кабеле (50 лент), I_{0c} – критический ток 4 мм ленты в азоте в собственном поле. На данный момент значения критического тока могут достигать 200А, поэтому, с учетом запаса в 20%, I_{0c} полагался равным 160 А.

Пример рассчитанных зависимостей для сборки из 7 CORC-кабелей представлен на Рис. 3.

Для определения рабочих параметров токамака были численно рассчитаны распределения магнитного поля на катушке и в полоидальном сечении при пропускаемом через катушку транспортном токе величиной 10 кА. Результаты расчетов представлены на Рис. 4.

Из полученных распределений определены отношения величины индукции магнитного поля к току в рабочей точке (0,25 м от оси симметрии токамака) k_{min} и в точке с максимальным полем на катушке k_{max} ($k_{max} = 0,026$ Тл / кА, $k_{min} = 0,00957$ Тл / кА). На основе указанных данных была построена нагрузочная кривая магнита:

$$B_{max} = I \cdot k_{max}. \quad (4)$$

Уравнение (4) представляет собой зависимость максимального поля на обмотке B_{max} от транспортного тока I , пропускаемого через катушку. Эта зависимость представлена на Рис. 3 пунктирной линией. Пересечение кривой, определяемой уравнением (4), с кривой максимального тока через кабель

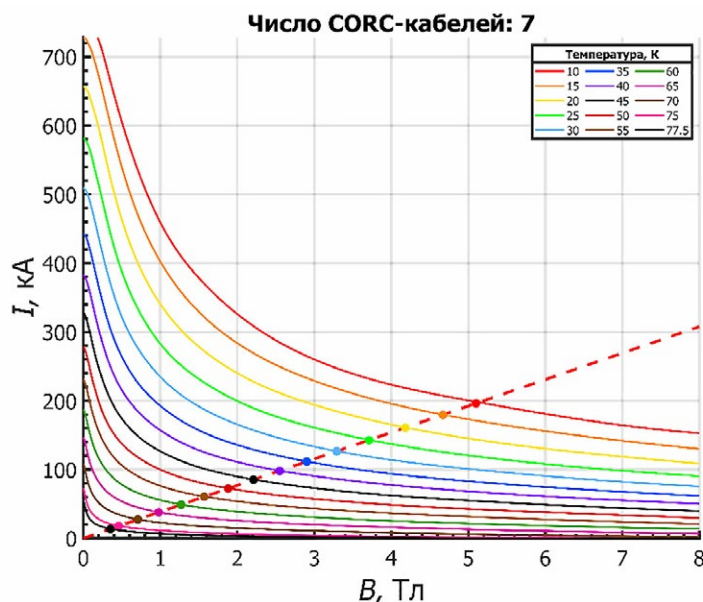


Рис. 3. Зависимости критического тока сборки CORC-кабелей от внешнего магнитного поля при разных температурах (пунктиром обозначена нагрузочная кривая магнита)

Fig. 3. Dependence of the critical current of CORC cable assemblies on the external magnetic field at different temperatures (the dotted line denotes the magnet load curve)

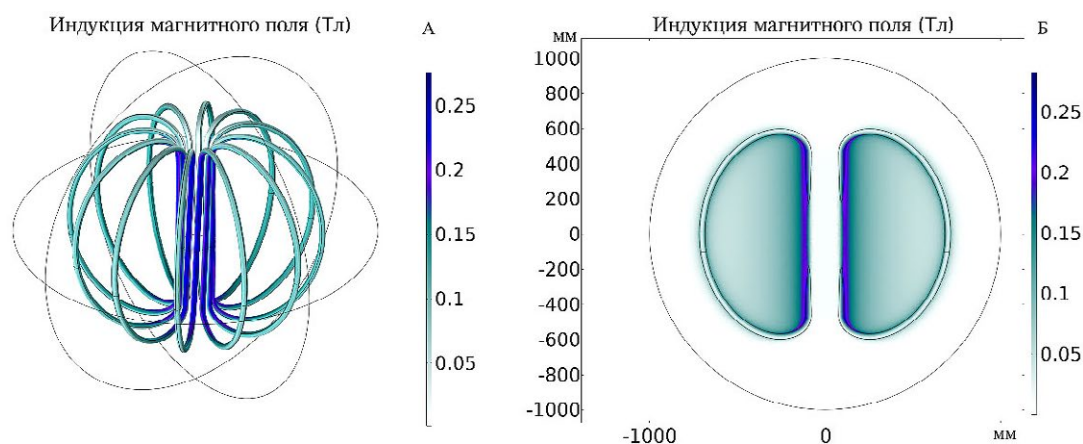


Рис. 4. Распределение магнитного поля. А – на катушке, Б – в полоидальном сечении
Fig. 4. Magnetic field distribution. А – on the coil, Б – in the poloidal cross section

от приложенного магнитного поля позволяет оценить величину рабочего значения тока $I_{\text{раб}}(T, N)$ через катушку для заданного значения температуры T и числа CORC-кабелей N . Используя рабочее значение тока, можно найти рабочее поле согласно следующей формуле:

$$B_{\text{раб}}(T, N) = I_{\text{раб}}(T, N) \cdot k_{\text{min}}. \quad (5)$$

Полученные данные показывают (Рис. 5), что значение рабочего поля в 1 Тл может быть достигнуто на 7 CORC-кабелях при температуре в 37,6 К и на 6 CORC-кабелях при температуре в 33,6 К. Эти значения температуры

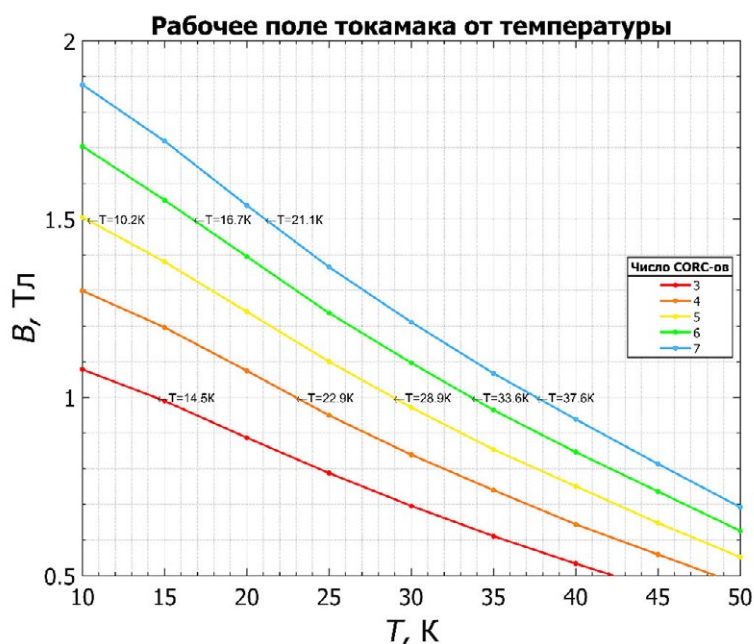


Рис. 5. Зависимость рабочего поля токамака от температуры для разных значений числа CORC-кабелей в тороидальной катушке

Fig. 5. Dependence of the operational field of the tokamak on temperature for different values of the number of CORC cables in the toroidal coil

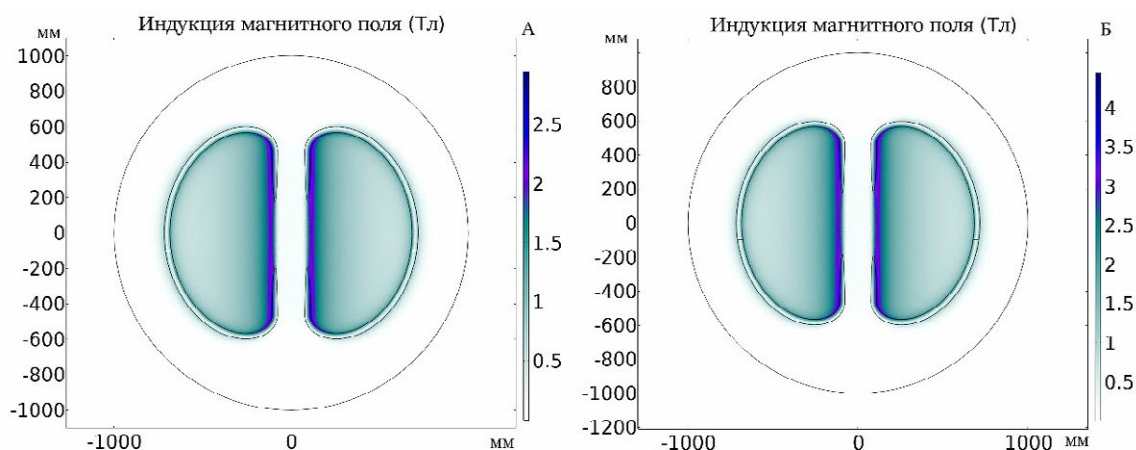


Рис. 6. Распределение магнитного поля в полоидальном сечении. А – для рабочего поля 1 Тл, Б – для рабочего поля 1,5 Тл

Fig. 6. Magnetic field distribution in the poloidal cross-section. А – for an operational field of 1 T, В – for an operational field of 1.5 T

могут быть достигнуты с использованием широко распространенных на рынке высокопроизводительных криорефрижераторов, позволяющих охлаждать рабочий жидкий или газообразный хладагент до температур порядка 30 К. Помимо этого, возможно достижение значений рабочего поля порядка 1,5 Тл на 7 CORC-кабелях при понижении температуры до 21,1 К. Распределения магнитного поля в полоидальном сечении для рабочих полей 1 Тл и 1,5 Тл представлены на Рис. 6а и 6б, соответственно. Суммарный транспортный ток через катушку, необходимый для достижения рабочего значения индукции магнитного поля, равен 104 кА и 157 кА, соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены результаты численного расчета магнитных характеристик системы тороидального поля сверхпроводящего токамака MEPhIST-1. Используя рассчитанные распределения магнитного поля, получены коэффициенты пропорциональности, связывающие максимальную величину магнитного поля на катушке и транспортный ток, а также рабочее магнитное поле и рабочий транспортный ток. Были рассчитаны зависимости критического тока сборки из различного количества CORC-кабелей от внешнего магнитного поля при различных значениях температуры и зависимость рабочего поля токамака от температуры для нескольких значений числа CORC-кабелей в сборке. Также были определены рабочие параметры данного токамака, а именно рабочая температура, величина рабочего транспортного тока и необходимое для достижения рабочего поля количество CORC-кабелей при различных рабочих температурах.

Рассчитанные коэффициенты пропорциональности для максимального поля на катушке и рабочего поля равны $k_{\max}=0,026$ Тл/кА и $k_{\min}=0,00957$ Тл/кА соответственно. Используя коэффициенты пропорциональности, получены зависимости рабочего поля токамака от температуры для нескольких значений числа CORC-кабелей в сборке. По этим зависимостям установлено, что значение рабочего поля в 1 Тл может быть достигнуто на сборке из 7 CORC-кабелей при температуре в 37,6 К и на сборке из 6 CORC-кабелей при температуре в 33,6 К. Указанные значения температуры могут быть достигнуты с использованием широкодоступных на рынке высокопроизводительных криорефрижераторов, позволяющих охлаждать рабочий жидкий или газообразный хладагент до температур порядка 30К. Помимо этого, возможно достижение значений рабочего поля порядка 1,5 Тл на сборке из 7 CORC-кабелей при понижении температуры до 21,1 К.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00749, <https://rscf.ru/project/24-29-00749/>.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Muehlich P., Hamacher T. Global transportation scenarios in the multi-regional EFDA-TIMES energy model // *Fusion Engineering and Design*. 2009. Vol. 84, N 7. P. 1361–1366. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2008.12.016>
2. Lerede D., Saccone M., Bustreo C., et al. Could clean industrial progresses and the rise of electricity demand foster the penetration of nuclear fusion in the European energy mix? // *Fusion Engineering and Design*. 2021. Vol. 172, N. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112880> EDN: BNAQQO
3. Gao X., Zhang T., Wu M., et al. Recent results of fusion triple product on EAST tokamak // *Plasma Science and Technology*. 2021. Vol. 23, N 9. doi: 10.1088/2058-6272/ac1165 EDN: RCDXUP
4. Kim H.-S., Jeon Y., Han H., et al. Development of high-performance long-pulse discharge in KSTAR // *Nuclear Fusion*. 2024. Vol. 64, N 1. P. 016033. doi: 10.1088/1741-4326/ad0fbd EDN: YEFTYI
5. Creely A.J., Greenwald M.J., Ballinger S.B., et al. Overview of the SPARC tokamak // *Journal of Plasma Physics*. 2020. Vol. 86, N 5. doi: 10.1017/S0022377820001257 EDN: XOIYOH
6. Zhai Y., van der Laan D., Connolly P., Kessel C. Conceptual design of HTS magnets for fusion nuclear science facility // *Fusion Engineering and Design*. 2021. Vol. 168, N. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112611> EDN: RFOOXZ
7. Molodyk A., Samoilenov S., Markelov A., et al. Development and large volume production of extremely high current density YBa₂Cu₃O₇ superconducting wires for fusion // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11, N 1. doi: 10.1038/s41598-021-81559-z EDN: FQXYLW
8. Federici G., Siccino M., Bachmann C., et al. Relationship between magnetic field and tokamak size—a system engineering perspective and implications to fusion development // *Nuclear Fusion*. 2024. Vol. 64, N 3. doi: 10.1088/1741-4326/ad2425 EDN: QJXQPS
9. Zohm H. On the Use of High Magnetic Field in Reactor Grade Tokamaks // *Journal of Fusion Energy*. 2019. Vol. 38, N 1. P. 3–10. doi: 10.1007/s10894-018-0177-y
10. Krat S., Prishvitsyn A., Alieva A., et al. MEPhIST-0 Tokamak for Education and Research // *Fusion Science and Technology*. 2023. Vol. 79, N 4. P. 446–464. doi: 10.1080/15361055.2022.2149033 EDN: ZIBZCH

11. Gryaznevich M., Asunta O. Overview and status of construction of ST40 // *Fusion Engineering and Design*. 2017. Vol. 123, N. P. 177–180. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.03.011> EDN: VDFVMW
12. Kuteev B.V., Azizov E.A., Bykov A.S., et al. Steady-state operation in compact tokamaks with copper coils // *Nuclear Fusion*. 2011. Vol. 51, N 7. doi: 10.1088/0029-5515/51/7/073013 EDN: MWVEXC
13. File J., Mills R.G., Sheffield G.V. Large Superconducting Magnet Designs for Fusion Reactors // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 1971. Vol. 18, N 4. P. 277–282. doi: 10.1109/TNS.1971.4326354
14. Shafranov V.D. Optimum Shape of a Toroidal Solenoid // *Soviet Physics Technical Physics*. 1973. Vol. 17. P. 1433.
15. Vinitskiy E.A., Ulasevich D.L., Prishvitsyn A.S., et al. Optimization of the Toroidal Magnetic Coil System for the Small Spherical Tokamak MEPhIST-0 // *Fusion Science and Technology*. 2025. Vol. 81, N 5. P. 485–494. doi: 10.1080/15361055.2024.2431782
16. Khodzhbagiyan H.G., Novikov M.S., Fisher E.Z., Shemchuk A.V. Concept of the High-Temperature Superconductor Magnetic System of the New Nuclotron Synchrotron // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. 2024. Vol. 21, N 1. P. 68–72. doi: 10.1134/S1547477124010060 EDN: GOFBTG
17. Alexandrov D.A., Martirosian I.V., Pokrovskii S.V., et al. Energy capacity and energy losses of inductive energy storage device based on composite HTS tapes // *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024. Vol. 10, N 2. P. 215–230. doi: <https://doi.org/10.17816/transsyst632274> EDN: LKEQVU

REFERENCES

1. Muehlich P, Hamacher T. Global transportation scenarios in the multi-regional EFDA-TIMES energy model. *Fusion Engineering and Design*. 2009;84(7):1361–1366. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2008.12.016>
2. Lerede D, Saccone M, Bustreo C, et al. Could clean industrial progresses and the rise of electricity demand foster the penetration of nuclear fusion in the European energy mix? *Fusion Engineering and Design*. 2021;172. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112880> EDN: BNAQQO
3. Gao X, Zhang T, Wu M, et al. Recent results of fusion triple product on EAST tokamak. *Plasma Science and Technology*. 2021;23(9). doi: 10.1088/2058-6272/ac1165 EDN: RCDXUP
4. Kim H-S, Jeon Y, Han H, et al. Development of high-performance long-pulse discharge in KSTAR. *Nuclear Fusion*. 2024;64(1). doi: 10.1088/1741-4326/ad0fbd EDN: YEFTYI
5. Creely AJ, Greenwald MJ, Ballinger SB, et al. Overview of the SPARC tokamak. *Journal of Plasma Physics*. 2020;86(5). doi: 10.1017/S0022377820001257 EDN: XOIYOH
6. Zhai Y, van der Laan D, Connolly P, Kessel C. Conceptual design of HTS magnets for fusion nuclear science facility. *Fusion Engineering and Design*. 2021;168. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112611> EDN: RFOOXZ

7. Molodyk A, Samoilenkov S, Markelov A, et al. Development and large volume production of extremely high current density YBa₂Cu₃O₇ superconducting wires for fusion. *Scientific Reports*. 2021;11(1):2084. doi: 10.1038/s41598-021-81559-z EDN: FQXYLW
8. Federici G, Siccino M, Bachmann C, et al. Relationship between magnetic field and tokamak size—a system engineering perspective and implications to fusion development. *Nuclear Fusion*. 2024;64(3):036025. doi: 10.1088/1741-4326/ad2425 EDN: QJXQPS
9. Zohm H. On the Use of High Magnetic Field in Reactor Grade Tokamaks. *Journal of Fusion Energy*. 2019;38(1):3–10. doi: 10.1007/s10894-018-0177-y
10. Krat S, Prishvitsyn A, Alieva A, et al. MEPhIST-0 Tokamak for Education and Research. *Fusion Science and Technology*. 2023;79(4):446–464. doi: 10.1080/15361055.2022.2149033 EDN: ZIBZCH
11. Gryaznevich M, Asunta O. Overview and status of construction of ST40. *Fusion Engineering and Design*. 2017;123:177–180. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.03.011> EDN: VDFVMW
12. Kuteev BV, Azizov EA, Bykov AS, et al. Steady-state operation in compact tokamaks with copper coils. *Nuclear Fusion*. 2011;51(7). doi: 10.1088/0029-5515/51/7/073013 EDN: MWVEXC
13. File J, Mills RG, Sheffield GV. Large Superconducting Magnet Designs for Fusion Reactors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 1971;18(4):277–282. doi: 10.1109/TNS.1971.4326354
14. Shafranov VD. Optimum Shape of a Toroidal Solenoid. *Soviet Physics Technical Physics*. 1973;17:1433.
15. Vinitskiy EA, Ulasevich DL, Prishvitsyn AS, et al. Optimization of the Toroidal Magnetic Coil System for the Small Spherical Tokamak MEPhIST-0. *Fusion Science and Technology*. 2025;81(5):485–494. doi: 10.1080/15361055.2024.2431782
16. Khodzhbagiyani HG, Novikov MS, Fisher EZ, Shemchuk AV. Concept of the High-Temperature Superconductor Magnetic System of the New Nuclotron Synchrotron. *Physics of Particles and Nuclei Letters*. 2024;21(1):68–72. doi: 10.1134/S1547477124010060 EDN: GOFBTG
17. Alexandrov DA, Martirosian IV, Pokrovskii SV, et al. Energy capacity and energy losses of inductive energy storage device based on composite HTS tapes. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(2):215–230. doi: <https://doi.org/10.17816/transsyst632274> EDN: LKEQV

Сведения об авторах:

Александров Дмитрий Александрович, инженер-исследователь;

eLibrary SPIN: 5365-6190; ORCID: 0009-0001-7383-0094;

E-mail: cfrfcfrfdima123@gmail.com

Мартirosян Ирина Валерьевна, канд. физ.-мат. наук; инженер-исследователь;

eLibrary SPIN: 3368-8809; ORCID: 0000-0003-2301-1768;

E-mail: mephizic@gmail.com

Виницкий Егор Александрович, инженер;

eLibrary SPIN: 9216-7080; ORCID: 0009-0003-9462-5756;

E-mail: egor.vinitsky@gmail.com

Осипов Максим Андреевич, инженер-исследователь;

eLibrary SPIN: 4776-7939; ORCID: 0000-0002-8981-5606;

E-mail: max.vfk@gmail.com

Покровский Сергей Владимирович, канд. физ.-мат. наук,

заведующий научно-исследовательской лабораторией;

eLibrary SPIN: 6643-7817; ORCID: 0000-0002-3137-4289;

E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com

Information about the authors:

Dmitry A. Aleksandrov, research engineer;

eLibrary SPIN: 5365-6190; ORCID: 0009-0001-7383-0094;

E-mail: cfrfcfrfdima123@gmail.com

Irina V. Martirosian, Cand. Sci. (Phys. Math.), research engineer;

eLibrary SPIN: 3368-8809; ORCID: 0000-0003-2301-1768;

E-mail: mephizic@gmail.com

Egor A. Vinitskiy, engineer;

eLibrary SPIN: 9216-7080; ORCID: 0009-0003-9462-5756;

E-mail: egor.vinitsky@gmail.com

Maxim A. Osipov, research engineer;

eLibrary SPIN: 4776-7939; ORCID: 0000-0002-8981-5606;

E-mail: max.vfk@gmail.com

Sergey V. Pokrovskii, Cand. Sci. (Phys. Math.), Head of the Laboratory;

eLibrary SPIN: 6643-7817; ORCID: 0000-0002-3137-4289;

E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com