УДК 621.039.623.533.9

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА ГЛОБУС-3 С РАЗЛИЧНЫМИ ВАРИАНТАМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СПЛАВОВ МЕДИ С ПОМОЩЬЮ КОДА GLOBSYS

А.Б. Минеев[1], В.Б. Минаев[2], Н.В. Сахаров[2], Н.Н. Бахарев[2], Э.Н. Бондарчук[1], А.А. Воронова[1], А.М. Глушаев[1], С.А. Григорьев[1], В.К. Гусев[2], Н.С. Жильцов[2], Е.Р. Запретилина[1], А.А. Кавин[1], Е.О. Киселёв[2], А.Ю. Конин[1], А.М. Кудрявцева[1], Г.С. Курскиев[2], А.Н. Лабусов[1], Ю.В. Петров[2], И.Ю. Родин[1], В.Н. Танчук[1], А.Ю. Тельнова[2], В.А. Трофимов[1], О.Г. Филатов[1]

[1]*АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия*
[2]*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*

В статье изложена инженерная часть кода GLOBSYS и проведён анализ возможных параметров установки Глобус-3, являющейся дальнейшим развитием программы Глобус. Основные цели этой установки: длинный импульс, большое тороидальное магнитное поле и мощный нагрев. Приведена идеология поиска параметров Глобус-3 при наличии физических и инженерных ограничений. Очевидно, что по физике для достижения длительного существования плазмы необходимы хорошее удержание и большая доля неиндуктивного тока. Инженерные ограничения участвуют в выборе параметров более сложным образом: в ряде случаев это перегрев обмоток, в других — суммарная мощность электропитания, в третьих — ограничение на запас потока в омическом соленоиде, в четвёртых — прочность элементов конструкции. Проведён предварительный выбор параметров сферического токамака Глобус-3 для случаев старта в «тёплой» медной ЭМС, а также предварительно захоложенной до температуры жидкого азота. В качестве ключевого условия было выбрано превышение длительности плато тока плазмы $\Delta t_{\text{plateau}}$ над характерным временем установления профилей плазмы $\tau_{L/R}$. При значениях тороидального магнитного поля $B_{t0} = 3$ Тл условие $\Delta t_{\text{plateau}} > \tau_{L/R}$ не достигается даже для предварительно захоложенной ЭМС. При $B_{t0} = 2$ Тл приемлемыми можно считать только варианты с предварительно захоложенной ЭМС, но размеры установки достаточно велики. При поле $B_{t0} = 1{,}5$ Тл вариантам с «тёплой» ЭМС соответствует длительность плато тока плазмы ~3 с ($\Delta t_{\text{plateau}}/\tau_{L/R} \sim 1$—1,5). В случае предварительно захоложенной ЭМС длительность плато может вырасти до 12—13 с ($\Delta t_{\text{plateau}}/\tau_{L/R} \sim 5$). В этом случае для дальнейшей проработки установки Глобус-3 в качестве основы представляется целесообразным принять варианты с геометрическими размерами: $R_0 \sim 0{,}6$—0,7 м, $a \sim 0{,}35$—0,4 м, $A \le 1{,}7$—1,8, $k_{95} \sim 1{,}7$—1,8. Проведены расчёты минимально допустимого значения тока плазмы $I_{\text{p, min}}$ при условии эффективного поглощения вводимой мощности нейтральной инжекции. В установке Глобус-3 в качестве базового значения выбрано $I_{\text{p}} \approx 0{,}8$ МА.

Ключевые слова: сферический токамак, системный код GLOBSYS, параметрические исследования, медная электромагнитная система, Глобус-3.

PARAMETRIC STUDIES OF GLOBUS-3 SPHERICAL TOKAMAK WITH VARIOUS VARIANTS OF MAGNETIC SYSTEM BASED ON COPPER ALLOYS USING THE GLOBSYS CODE

A.B. Mineev[1], V.B. Minaev[2], N.V. Sakharov[2], N.N. Bakharev[2], E.N. Bondarchuk[1], A.A. Voronova[1], A.M. Glushaev[1], S.A. Grigoriev[1], V.K. Gusev[2], N.S. Zhilzov[2], E.R. Zapretilina[1], A.A. Kavin[1], E.O. Kiselev[2], A.Yu. Konin[1], A.M. Kudriavtseva[1], G.S. Kurskiev[2], A.N. Labusov[1], Yu.V. Petrov[2], I.Yu. Rodin[1], V.N. Tanchuk[1], A.Yu. Telnova[2], V.A. Trofimov[1], O.G. Filatov[1]

[1]*JSC «NIIEFA», St. Petersburg, Russia*
[2]*Ioffe Institute of Physics and Technology, St. Petersburg, Russia*

Engineering part of GLOBSYS code is expounded. Parametrical analysis of spherical tokamak Globus-3 is done. Main goals of this installation are long pulse, high toroidal magnetic field and strong plasma heating power. Ideology of Globus-3 parameters selection is described in the presence of physical and technical limitations. Part of obtained physical results is obvious: for long pulse it is necessary good plasma confinement and high noninductive current fraction. Engineering limits are involved in choice of parameters by more complicated way: in a number of cases it is limit for coils heating, in others — total power supply or poloidal flux capacity or limit for mechanical strength. Preliminary selection of Globus-3 parameters carry out for two options of magnetic system (MS): with «warm» copper and copper preliminary cooled to liquid nitrogen temperature. The key criterion was the excess of the duration of the plasma current plateau $\Delta t_{\text{plateau}}$ over the characteristic time for the establishment of plasma profiles $\tau_{L/R}$. If toroidal magnetic field $B_{t0} = 3$ T, condition $\Delta t_{\text{plateau}} > \tau_{L/R}$ doesn't satisfy even for preliminary cooled copper MS. For $B_{t0} = 2$ T acceptable are only variants with preliminary cooled copper MS, but plasma radius growth sharply. For $B_{t0} = 1{,}5$ T and «warm» MS discharge plateau duration may be ~3 s ($\Delta t_{\text{plateau}}/\tau_{L/R} \sim 1$—1,5), while for preliminary cooled MS $\Delta t_{\text{plateau}}$ may reach 12—13 s ($\Delta t_{\text{plateau}}/\tau_{L/R} \sim 5$). In this case, reasonable dimensions for further design of installation Globus-3 may be following: $R_0 \sim 0{,}6$—0,7 m, $a \sim 0{,}35$—0,4 m, $A \le 1{,}7$—1,8, $k_{95} \sim 1{,}7$—1,8. Simulations of minimum allowable plasma current $I_{\text{p, min}}$, necessary for effective absorption of neutral beam in plasma were done. In Globus-3, a value of 0,8 MA is chosen as the base plasma current I_{p}.

Key words: spherical tokamak, system code GLOBSYS, parametrical investigations, Globus-3 parameters with copper magnet system.

DOI: 10.21517/0202-3822-2022-45-2-15-36

ВВЕДЕНИЕ

Базовые цели создания сферического токамака Глобус-3 указаны в работе [1]. Главные из них — существенное увеличение тороидального поля (до 1,5—3 Тл) и длительности разряда при имеющихся ограничениях мощности электропитания (125 МВА).

В работах [1, 2] приведены плазмофизическая модель, используемая в коде GLOBSYS, модели ряда инженерных подсистем токамаков и проведено сопоставление расчётных данных по коду GLOBSYS с данными экспериментов на сферических токамаках Глобус-М2, NSTX, MAST, а также с прогнозными параметрами, ожидаемыми на NSTX-U, MAST-U и ST40. Хорошее соответствие позволяет экстраполировать соотношения, используемые в коде GLOBSYS, на параметры сферического токамака Глобус-3. При этом физические параметры по коду GLOBSYS со скейлингом ИТЭР (с коэффициентом $H_{y,2}$ = 1—1,2) хорошо соответствуют достигнутым параметрам на Глобус-М2, NSTX, MAST и ожидаемым на NSTX-U, MAST-U и ST40 (в этом случае сопоставляются данные кода GLOBSYS и кодов, используемых для этих установок). В результате скейлинг ИТЭР может быть принят в качестве консервативной оценки для времени удержания. В то же время использование скейлинга Globus-2021 [1] по мере увеличения тороидального магнитного поля приводит к более оптимистическим значениям параметров плазмы. Этот скейлинг будет принят в качестве верхней оценки плазменных параметров.

В данной работе изложены элементы инженерной части кода GLOBSYS и анализируется вариант электромагнитной системы из медного сплава. При этом возможности увеличения тороидального магнитного поля ограничены имеющейся энергетикой. Кроме того, длительность разряда ограничена сверху допустимым разогревом центрального керна тороидальной ноги. Ещё одно ограничение на длительность разряда связано с соленоидом омического нагрева: полным запасом потока в нём и его нагревом за время импульса. В работе анализируются различные режимы работы электромагнитной системы из сплавов меди, а именно:

— ЭМС при комнатной начальной температуре, в ходе разряда нагрев до 100 ºС;

—ЭМС, захоложенная перед импульсом до азотных температур и разогреваемая в ходе импульса. Поскольку параметры установки необходимо вписать в ограничения по системе электропитания (125 МВА + накопительная энергетика), необходима модель, позволяющая связать параметры основных потребителей мощности (обмотки тороидального поля (ОТП), центральный соленоид (ЦС), обмотки полоидального поля, система нагрева плазмы) с мощностью, отбираемой от сети.

Отметим, что уже в токамаке Глобус-М2 с тороидальным полем 1 Тл оцененные затраты мощности [1] оказываются на уровне 20 МВА (в ОТП при токе 110 кА) + 20 МВА (в ЦС при полном токе по проводнику 70 кА).

КОНЦЕПЦИЯ КОНСТРУКЦИИ СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА ГЛОБУС-3

Для сферического токамака Глобус-3 принята схема расположения подсистем по большому радиусу, показанная на рис. 1.

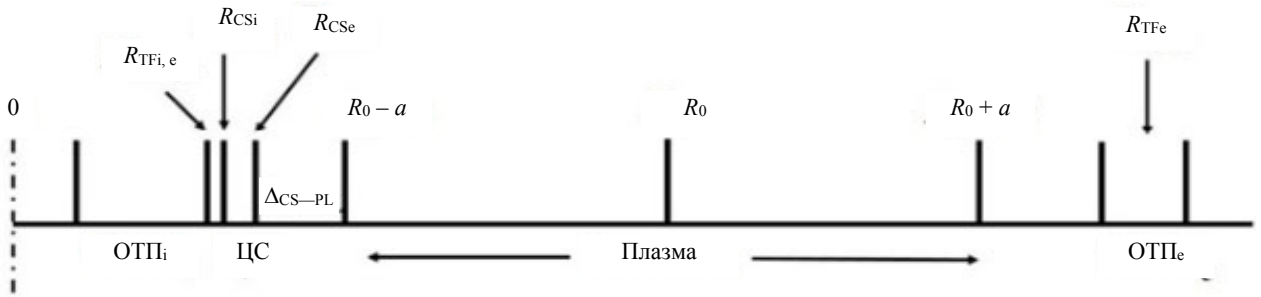


Рис. 1. Расположение подсистем сферического токамака Глобус-3 по большому радиусу: ОТПi — обмотка тороидального магнитного поля на внутреннем обводе с наружным радиусом $R_{TFi,\,e}$; ЦС — центральный соленоид (внутренний и наружный радиусы R_{CSi} и R_{CSe}); $\Delta_{CS—PL}$ — зазор, включающий тепловой экран, вакуумную камеру, первую стенку и скрэп-слой; плазма, расположенная от $R_0 - a$ до $R_0 + a$; ОТПe — обмотка тороидального поля на внешнем обводе со средним радиусом R_{TFe}

Принято, что тороидальная обмотка разборная. Это может дать некоторый выигрыш по расходуемой мощности питания (за счёт утолщения внешней ноги тороидальной обмотки и соответственно снижения её сопротивления) в случае, если сопротивлением разъёмных узлов можно пренебречь.

ЦС наматывается на внутреннюю ногу тороидальной обмотки (ЦС внутри ОТП). По сравнению с расположением ЦС вне ОТП это даёт ощутимый выигрыш по запасу полоидального потока. В Глобус-3 основным методом создания, роста и поддержания тока плазмы принято изменение потока в ЦС.

Положение наружной части ОТП по большому радиусу R_{TFe} определяется допустимым уровнем гофрировки магнитного поля на границе (0,3—0,4% по экватору на радиусе $R_0 + a$).

Такое расположение подсистем по большому радиусу продолжает принятое в линейке сферических токамаков Глобус-М, Глобус-М2, MAST, MAST-U, NSTX, NSTX-U, ST40.

Основной конфигурацией плазмы считается диверторная, двухнулевая конфигурация с возможностью перехода к однонулевой. Базовая вытянутость сечения плазмы задаётся на уровне $k_x \le 2$. Такая вытянутость заметно меньше максимально достигнутых значений в MAST и NSTX и ожидаемых величин в MAST-U, NSTX-U, ST-40, ТИН-СТ (в них допускается значение вытянутости $k_x = 2{,}5$—$2{,}75$). Выбор величины k_x обусловлен тем обстоятельством, что рутинное проведение экспериментов при предельной вытянутости выглядит крайне проблематичным. При этом задача достижения максимально возможной величины k_x в токамаке Глобус-3 сохраняется.

По близким причинам и диверторные устройства для установки Глобус-3 пока предполагается выполнить более простыми, чем те, которые используются в JET и JT-60SA и планируются в международном токамаке ИТЭР (закрытый W-образный дивертор). В установке Глобус-3 принята существенно более компактная по вертикали концепция открытого дивертора, близкая к используемой в ST40.

Предполагается, что вакуумная камера и дивертор охлаждаются только между импульсами. В качестве материала проводника электромагнитной системы предполагается использовать медный сплав на основе холоднокатанной бескислородной серебросодержащей бронзы фирмы Luvata Pori Oy (Oxygen-Free Silver Bearing Cold Extruded Copper). Такой сплав использовался при создании электромагнитных систем токамаков Глобус-М, Глобус-М2, ST40, Т-15МД, КТМ и других. Измерения, проведённые с образцом такой бронзы, проведённые в АО «НИИЭФА», подтвердили характер зависимости удельного сопротивления от температуры, показанной на рис. 2.

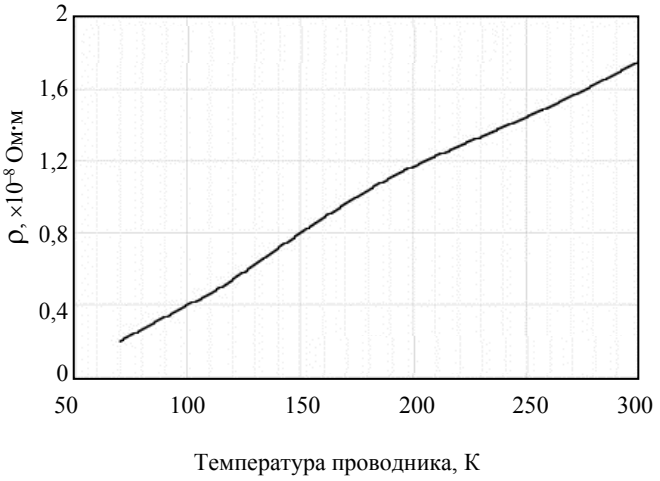


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления серебросодержащей бронзы от температуры. Данные измерений АО «НИИЭФА»

Для зависимости удельного сопротивления от температуры $\rho(T)$ (при $T > 20$ ºС) используется соотношение из работы [3]:

$$\rho_{el}(T) = \rho_{20\,°C}(1 + 0{,}0041(T - 20\ °C)),$$

где $\rho_{20\,°C} = 1{,}72\cdot10^{-2}$ мкОм·м, которое при $T = 100$ ºС даёт значение удельного сопротивления $\rho_{el} = 2{,}3\cdot10^{-2}$ мкОм·м.

По мере захолаживания меди удельное сопротивление при $T \ge 50$ К снижается примерно линейно с температурой. Данные удельного сопротивления, показанные на рис. 2, в диапазоне температуры 70—295 К хорошо соответствуют удельному сопротивлению чистой меди из справочника [4] и простому соотношению

$$\rho_{el} = 7\cdot10^{-5}(T - 45)\ [\text{мкОм·м, К}]. \quad (1)$$

При захолаживании меди важно учитывать также зависимость от температуры удельной теплоёмкости c_p. Зависимость $c_p(T)$ в диапазоне температуры 50—400 К приведена в справочнике [4]. Она близка к данным работы [5] и формуле

$$c_p = 400\left(1 - \left(1 + \frac{10}{T}\right)\exp\left(-\frac{T}{100}\right)\right)\ [\text{Дж/кг/град; } T, \text{ К}]. \quad (2)$$

Далее при оценках нагрева медного проводника за время импульса будем использовать зависимости (1) и (2).

ПОДХОД К ОЦЕНКЕ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ГЛОБУС-3

Работа системы питания при организации импульса разряда плазмы в токамаке включает в себя заведение тока в обмотки электромагнитной системы и их скоординированное изменение, требующееся для организации пробоя газа, подъёма и поддержание тока плазмы, подвод мощности систем нагрева, затраты мощности на работу инфраструктурных подсистем и т.д.

При простой оценке максимальной потребляемой мощности системы питания целесообразно разделить подведение мощности к установке на быстро и медленно меняющуюся часть. При этом для организации быстроменяющихся процессов следует применять источники питания на основе ёмкостных накопителей, а для более медленно меняющихся процессов — базовые сетевые источники.

Основные затраты мощности электропитания происходят в ОТП, в центральном соленоиде, в обмотках полоидального магнитного поля и в системах нагрева плазмы. При этом в сферическом токамаке наиболее важным элементом электромагнитной системы, влияющим на суммарную мощность питания, является центральный керн, включающий в себя внутреннюю ногу ОТП и расположенный на ней ЦС. При создании и отработке конструкции требуется обеспечить, чтобы суммарное сопротивление разъёмных узлов тороидальной обмотки было существенно меньше сопротивления внутренней тороидальной ноги.

В первом приближении основными компонентами затрат мощности будем считать тороидальную обмотку, ЦС и системы нагрева плазмы. С учётом ограничения мощности базовой энергетики Глобус-3 в 125 МВА для оценок активной мощности, потребляемой центральным керном и системами нагрева плазмы (с некоторым запасом), примем величину 100 МВт.

Некоторое представление об уровне вклада ОТП, ЦС и систем нагрева плазмы в суммарную мощность электропитания для токамаков Т-15МД и КТМ даёт табл. 1.

Т а б л и ц а 1. **Оценочные параметры мощности питания в проектах Т-15МД и КТМ**

Параметр	Т-15МД [6]	КТМ [7, 8]
ОТП		
Ток по проводнику, кА	22	60
Сопротивление в начале/конце разряда, мОм	260*/320**	6,8
Мощность энергопотребления в ОТП, МВт	125*/155**	~25
ЦС		
Ток по проводнику, кА	40	30
Сопротивление, мОм	11; 34; 11	30,5
Максимальная мощность потребления ЦС, МВт	90	~30
Системы нагрева плазмы		
Суммарная мощность дополнительного нагрева, МВт	15—20	5—7
Мощность питания систем доп. нагрева от сети, МВт	40—50	~20
ОТП + ЦС + система нагрева плазмы (суммарная активная мощность энергопотребления), МВт	255*—295**	~75
Ограничение на мощность электропитания, МВА	300	125

*Начало разряда, температура проводника $T_{пр}$ = 20 °С.
**Конец разряда, $T_{пр}$ = 80 °С.

При дальнейшем анализе параметров Глобус-3 принимается, что плотность тока в элементах центрального керна (внутренняя нога тороидальной обмотки и ЦС) будет существенно превышать 30 МА/м^2. Это позволяет выполнить обмотку более компактной и уменьшить габариты установки при условии выполнения требований по прочности и охлаждению.

Можно принять, что во время разрядного импульса нагрев ОТП близок к адиабатическому, а его охлаждение осуществляется только между импульсами. Граница по плотности тока между возможностью стационарного отвода тепла от медного проводника в ходе разрядного импульса и нагревом без охлаждения, по-видимому, находится в области плотности тока ~30 МА/м^2. Так, в работе [9] для варианта стационарного охлаждения проводника тороидальной обмотки ТИН-СТ просчитана конструкция с неоднородным распределением плотности тока по шине с максимумом 30 МА/м^2 и минимумом 15 МА/м^2. В работе [3] упоминается значение 20 МА/м^2 в качестве величины, близкой к пределу для

обычных многовитковых обмоток. В проекте реактора на основе сферического токамака ARIES-ST [10] уровень плотности тока по тороидальной обмотке составил 13 МА/м^2 при коэффициенте заполнения проводником около 0,85.

ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОРОИДАЛЬНОЙ ОБМОТКИ И АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В токамаке Глобус-М2 измеренное суммарное сопротивление тороидальной обмотки составило 1,2 мОм. Вклад в сопротивление от внутренних частей ОТП 0,7 мОм, наружных 0,2 мОм, компенсаторов 0,3 мОм. При этом соотношение между полным сопротивлением и сопротивлением внутренних частей ОТП около 2:1.

Для NSTX-U использование данных работ [11, 12] приводит к оценке суммарного сопротивления ОТП ~2,5 мОм, внутренних частей ~1,2 мОм, для ST40 из [13, 14] соответственно ~1,3 мОм и ~0,6—0,7 мОм, т.е. соотношение 2:1 и в этих случаях примерно выполняется.

Далее при параметрическом анализе для оценки полного сопротивления тороидальной обмотки Глобус-3 принимается удвоенное значение сопротивления узкой части внутренних областей ОТП. При этом приблизительно учитывается вклад внешних частей тороидальных обмоток, разъёмов и компенсаторов. Для действующих установок Глобус-М, Глобус-М2, NSTX-U и ST40 это соотношение примерно соблюдается.

Плотность тока по проводнику узкой части тороидальной обмотки j_{TF} даётся соотношениями

$$I_{TF\Sigma} = \frac{2\pi B_{t0} R_0}{\mu_0};\ j_{TFc} = \frac{I_{TF\Sigma}}{\pi R_{TFi,e}^2};\ j_{TF} = \frac{j_{TFc}}{k_{TF}}, \tag{3}$$

где $I_{TF\Sigma}$ — суммарный ток по тороидальной обмотке; j_{TFc} — конструктивная плотность тока по тороидальной обмотке; k_{TF} — доля проводника в ОТП.

Активная мощность питания тороидальной обмотки

$$P_{TF} = R_{TF} I_{TF}^2. \tag{4}$$

СЦЕНАРИЙ РАЗРЯДА

В токамаке Глобус-3 предполагается достижение уровня тороидального магнитного поля на оси плазмы до 1,5—3 Тл при ограничениях суммарной мощности, потребляемой установкой (≤125 МВА), и температуры обмоток ЭМС (для медных обмоток ≤100 °С). Ранее были приведены методики оценки мощности электропитания и нагрева обмоток в ходе плазменного разряда. Для достижения максимальной длительности плато разряда необходим существенный перегрев обмоток ЭМС, что делает важным учёт динамики изменения их сопротивления и теплоёмкости. Поэтому при параметрическом анализе нужно иметь сценарии основных потребителей мощности.

На рис. 3 показаны простые сценарии изменения плотности тока в ОТП (j_{TF}) и ЦС (j_{CS}), необходимые для оценки степени нагрева меди в ходе разряда. На плато тока плазмы включается дополнительный нагрев.

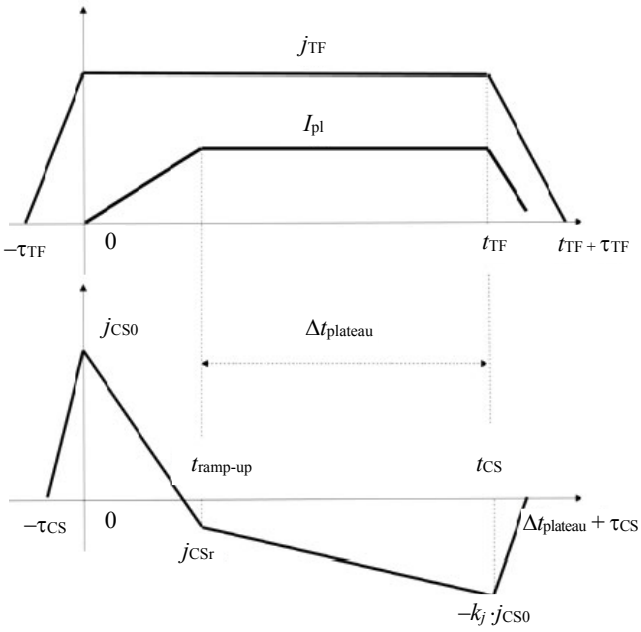


Рис. 3. Сценарии изменения плотности тока по проводнику ОТП (TF) — вверху CS — внизу: Δt_{TF} — длительность плато тороидального поля; τ_{TF} и τ_{CS} — характерное время заведения тока в ОТП и ЦС; $\Delta_{ramp\text{-}up}$ — время подъёма тока плазмы; $\Delta t_{plateau} = \Delta t_{CS} — \Delta t_{ramp\text{-}up}$ — длительность плато тока плазмы ($\Delta t_{CS} \le \Delta t_{TF}$); $k_j \le 1$ ($k_j = 1$ соответствует полному перемагничиванию, $k_j < 1$ — неполному). Значение плотности тока j_{CSr} при выходе тока плазмы на плато определяется балансом потока

Уравнение нагрева проводника ОТП и ЦС в ходе разряда имеет вид

$$\frac{dT_{\mathrm{Cu}}}{dt} = \frac{\rho_{\mathrm{el}}(T_{\mathrm{Cu}})\, j^2(t)}{\gamma c_{\mathrm{p}}(T_{\mathrm{Cu}})}. \tag{5}$$

Здесь γ — удельный вес меди (γ = 8900 кг/м^3); j — плотность тока по проводнику; ρ_{el} и c_{p} — удельные сопротивление и теплоёмкость меди (см. соотношения (1) и (2)); T_{Cu} — температура медного (Cu) проводника.

СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО СОЛЕНОИДА

Грубую оценку характерного времени заведения тока в центральный соленоид τ_{CS} можно получить через отношение его индуктивности L_{CS} и сопротивления R_{elCS} при известном напряжении источника питания:

$$\tau_{\mathrm{CS}} = \frac{L_{\mathrm{CS}}}{R_{\mathrm{elCS}}} \approx \frac{\mu_0}{4\rho_{\mathrm{el}}}(R_{\mathrm{CSe}}^2 - R_{\mathrm{CSi}}^2). \tag{6}$$

Для параметров NSTX-U соотношение (6) даёт $\tau_{\mathrm{CS}} \approx 0{,}3$ с, близкое к приведённому в [15]. Для Глобус-М2 время заведения тока в ЦС также близко к экспериментальному значению: из соотношения (6) $\tau_{\mathrm{CS}} \approx 0{,}06$ с, экспериментальное значение $\tau_{\mathrm{CS}} \approx 0{,}07$ с (см. рис. 3 в работе [1]).

Длительность стадии подъёма тока плазмы $t_{\mathrm{ramp\text{-}up}}$ следует из закона Кирхгофа: $dI_{\mathrm{p}}/dt \approx U_{\mathrm{ext}}/L_{\mathrm{p}}$. Оптимальное значение напряжения на обходе на стадии подъёма тока (с невысоким уровнем МГД-возмущений и отсутствием скинирования профиля тока) для большинства токамаков на уровне нескольких вольт. В этом случае для $t_{\mathrm{ramp\text{-}up}}$ можно принять оценку

$$t_{\mathrm{ramp\text{-}up}} \approx 0{,}5 R_0 I_{\mathrm{p}} \quad [\text{с, м, МА}]. \tag{7}$$

Так, для параметров Глобус-М2 (R_0 = 0,36 м, I_{p} = 0,4 МА) формула (7) даёт $t_{\mathrm{ramp\text{-}up}} \sim 70$ мс (экспериментальное значение, см. рис. 1 из работы [1], $t_{\mathrm{ramp\text{-}up}} \sim 50$—70 мс). В случае NSTX-U (R_0 = 0,94 м, I_{p} = 2 МА) из (5) следует $t_{\mathrm{ramp\text{-}up}} \sim 1$ с, что совпадает с приведённым в [15]. Отметим, что в NSTX при токе плазмы <1 МА [16] достигнуты более короткие времена подъёма тока плазмы, чем по соотношению (7). Для Т-15МД ($R_0 \approx 1{,}5$ м, I_{p} = 1—2 МА) получим $t_{\mathrm{ramp\text{-}up}}$ = 0,8—1,6 с, близкое к проектным данным 1—2 с [6]. Для параметров ИТЭР (R_0 = 6,2 м, I_{p} = 15 МА) экстраполяция соотношения (7) также даёт разумную оценку времени подъёма тока $t_{\mathrm{ramp\text{-}up}} \approx 50$ с.

Отметим, что в системном коде PROCESS [17] для времени подъёма тока плазмы используется соотношение $t_{\mathrm{ramp\text{-}up}} \approx 2I_{\mathrm{p}}$ [с, МА] с той же зависимостью от тока плазмы, но применимое, по-видимому, только для установок реакторных размеров (с $R_0 > 4$ м).

Плотность тока по проводнику центрального соленоида с однородным распределением тока по сечению определяется соотношениями

$$I_{\mathrm{CS\Sigma}} = \frac{B_{\mathrm{CS0}} H_{\mathrm{CS}}}{\mu_0};\;\; j_{\mathrm{CSc}} = \frac{I_{\mathrm{CS\Sigma}}}{H_{\mathrm{CS}}(R_{\mathrm{CSe}} - R_{\mathrm{CSi}})} = \frac{I_{\mathrm{CS\Sigma}}}{H_{\mathrm{CS}}\Delta_{\mathrm{CS}}};\; j_{\mathrm{CS}} = \frac{j_{\mathrm{CSc}}}{k_{\mathrm{CS}}}, \tag{8}$$

где B_{CS0} — максимальное значение магнитного поля; H_{CS} — высота; $I_{\mathrm{CS\Sigma}}$ — суммарный ток по ЦС; j_{CSc} и j_{CS} — конструктивная плотность тока и плотность тока по проводнику; k_{CS} — доля проводника в обмотке центрального соленоида; $\Delta_{\mathrm{CS}} = R_{\mathrm{CSe}} - R_{\mathrm{CSi}}$ — толщина ЦС.

Активная мощность питания соленоида

$$P_{\mathrm{CS}} = \rho_{\mathrm{el}} \frac{\pi(R_{\mathrm{CSe}} + R_{\mathrm{CSi}})}{H_{\mathrm{CS}}(R_{\mathrm{CSe}} - R_{\mathrm{CSi}})} I_{\mathrm{CS\Sigma}}^2 = \rho_{\mathrm{el}} \frac{2\pi R_{\mathrm{CSave}}}{H_{\mathrm{CS}}\Delta_{\mathrm{CS}}} I_{\mathrm{CS\Sigma}}^2, \tag{9}$$

где $R_{\mathrm{CSave}} = (R_{\mathrm{CSe}} + R_{\mathrm{CSi}})/2$ — средний радиус соленоида.

БАЛАНС ПОЛОИДАЛЬНОГО ПОТОКА

Приведём используемые в коде GLOBSYS стандартные соотношения для компонентов полоидального магнитного потока:

$$\Psi_{CS0} = \pi B_{CS0} \frac{R_{CSi}^2 + R_{CSi}R_{CSe} + R_{CSe}^2}{3}; \Delta\Psi_{ramp\text{-}up} = C_{Ejima}\mu_0 R_0 I_p; \ \Delta\Psi_{ind} = L_p I_p;$$

$$\Delta\Psi_{plateau} = U_{res}\Delta t_{plateau}; \ \Delta\Psi_{eq} = \pi B_{eq}(R_0^2 - R_{CSe}^2), \tag{10}$$

где Ψ_{CS0} — начальный запас потока; $\Delta\Psi_{ramp\text{-}up}$ — затраты потока на стадии подъёма тока плазмы; $\Delta\Psi_{ind}$ — индуктивные затраты потока; $\Delta\Psi_{plateau}$ — затраты потока на плато тока; $\Delta\Psi_{eq}$ — вклад в поток от обмоток равновесия.

В ходе разряда запас потока в соленоиде меняется от Ψ_{CS0} до $-k_j\Psi_{CS0}$, при этом случаю $k_j = 1$ соответствует полное перемагничивание соленоида.

Значение полоидального магнитного потока в момент выхода на плато тока плазмы в модели составляет

$$\Psi_{CS\ ramp\text{-}up} = \Psi_{CS0} - \Delta\Psi_{ramp\text{-}up} - L_p I_p + \Delta\Psi_{eq}, \tag{11}$$

при этом плотность тока по проводнику в момент выхода тока на плато равна $j_{CS\ ramp\text{-}up}$ — начальному запасу потока Ψ_{CS0} соответствует плотность тока j_{CS0}.

Начальный поток Ψ_{CS0} (10) линейно зависит от магнитного поля в центре соленоида B_{CS0}. Сверху величина поля B_{CS0} ограничена прочностью конструкции соленоида и нагревом. Для параметров токамаков Глобус-М и Глобус-М2 значение $B_{CS0} \sim 8$ Тл. При этом центральный соленоид относительно толстый (для Глобус-М относительная толщина на среднем радиусе $\delta_{CS} = 2\Delta_{CS}/(R_{CSe} + R_{CSi}) \approx 0{,}54$ и $B_{CS0} \approx 8{,}3$ Тл, для Глобус-М2 $\delta_{CS} \approx 0{,}42$ и $B_{CS0} \approx 8$ Тл).

При увеличении размеров сферического токамака относительная толщина соленоида уменьшается. Так, для параметров NSTX-U $\delta_{CS} < 0{,}2$. Для соленоида, изготовленного из сплавов меди, максимально допустимый уровень напряжений в материале масштаба $\sigma_{max} \approx 200$ МПа. В этом случае из соотношения, связывающего уровень механических напряжений в соленоиде с полем и геометрией [18]:

$$\sigma = \frac{B_{CS}^2(r)}{2\mu_0}\frac{r}{R_{CSe} - r}; \ B_{CS}(r) = \mu_0 j_{CSc}(R_{CSe} - r) \tag{12}$$

следует оценка максимального поля

$$B_{CS\,max} \approx \sqrt{\mu_0 \sigma_{max}\frac{\Delta_{CS}}{R_{CSi}}}, \tag{13}$$

которая даёт для параметров NSTX-U при $\sigma_{max} \approx 200$ МПа значение $B_{CSmax} \approx 7$ Тл. Эта оценка B_{CSmax} близка к проектным данным токамаков NSTX и NSTX-U [15]: $B_{CS0} = 6{,}9$ Тл (NSTX) и $B_{CS0} = 7{,}3$ Тл (NSTX-U).

Отметим, что при оценке затрат потока на стадии подъёма тока плазмы (10) мы используем так называемый коэффициент Ejima — C_{Ejima}. Как показано в работе [2] (при сопоставлении составляющих баланса потока), его значение составляет $C_{Ejima} \sim 0{,}33$ для оптимизированных сценариев в NSTX и NSTX-U и $C_{Ejima} \sim 0{,}4$—$0{,}5$ — для Глобус-М2, MAST, MAST-U и ST40. Значение индуктивности плазмы L_p рассчитывается по соотношениям работы [1].

В табл. 2 приведено сопоставление затрат потока на стадии подъёма $\Delta\Psi_{ramp\text{-}up}$ и $\Delta\Psi_{ind}$ с соотношением для $\Delta\Psi_G$ из работы [19]

$$\Delta\Psi_G = 0{,}4A\mu_0 R_0 I_p. \tag{14}$$

Величина $\Delta\Psi_G$ является аналогом суммы резистивной и индуктивной составляющих потока на стадии подъёма тока плазмы $\Delta\Psi_{ramp\text{-}up} + \Delta\Psi_{ind}$, а коэффициент $0{,}4A$ в формуле (14) — аналогом коэффициента Ejima—Wesley $C_{E\text{—}W}$.

Как следует из таблицы, значение результирующего коэффициента Ejima—Wesley оказывается близким к скейлингу Грязневича [16], в котором $C_{E\text{—}W} \approx 0{,}4A$ для оптимизированных по затратам потока сценариев NSTX и NSTX-U, а также для ST40 (с использованием схемы «merging compression»). Отметим, что в NSTX было достигнуто рекордно низкое значение $C_{E\text{—}W} \approx 0{,}5$ при $A = 1{,}28$ [16].

Т а б л и ц а 2. **Сопоставление затрат магнитного потока на стадии подъёма тока плазмы для ряда сферических токамаков**

Параметр	Глобус-М2, № 38 800 [1]	NSTX [2]	NSTX-U [2]	MAST [2]	MAST-U [2]	ST40 [2]
R_0, м	0,365	0,89	0,94	0,85	0,82	0,40
A	1,53	1,46	1,7	1,31	1,54	1,67
k	1,64	2,5	2,75	2,1	2,5	2,5
B_{t0}, Тл	0,81	0,48	1	0,52	0,78	3
I_p, МА	0,44	1,33	2	1,2	2	2
$\Delta\Psi_{ramp\text{-}up}$, Вб	0,12	0,48**	0,8	~0,5	~0,8	~0***
$\Delta\Psi_{ind}$, Вб	0,15*	0,55*	1,1*	0,6*	1,1*	~0,6*
$\Delta\Psi_{ramp\text{-}up} + \Delta\Psi_{ind}$, Вб	0,27	1,03	1,9	1,1	1,9	~0,6
$\Delta\Psi_G$, Вб	0,124	0,87	1,6	0,67	1,27	0,67
C_{Ejima}	~0,5	0,33	0,33	~0,4	~0,4	0
$C_{E—W}$	1,3	0,69	0,8	0,85	0,9	0,6
0,4 A	0,61	0,58	0,68	0,52	0,62	0,67

*По соотношению (12) [1].
**По [14].
***Применена схема «merging compression».

В то же время затраты потока в MAST и MAST-U больше, а в Глобус-М2 существенно (практически вдвое) больше, чем по скейлингу Грязневича. Для разряда Глобус-М2 это можно объяснить неполной оптимизацией затрат полоидального потока на стадии подъёма тока плазмы, а также несколько меньшей вытянутостью плазменного шнура в Глобус-М2 (k = 1,8—2,0 по сравнению с k = 2,5—2,75 в NSTX, NSTX-U, MAST-U и ST40).

Далее при оценках параметров Глобус-3 будут использоваться соотношения (10) со значением коэффициента Ejima $C_{Ejima} \sim 0{,}4$—$0{,}45$.

Для вертикального равновесного поля B_{eq}, входящего в уравнение (10) для $\Delta\Psi_{eq}$, используется соотношение

$$B_{eq} = \frac{\mu_0 I_p}{4\pi}\left(\ln\left(\frac{8R_0}{ak^{1/2}}\right) - 1{,}5 + \beta_p + \frac{l_i}{2}\right), \tag{15}$$

формально применимое только в пределе большого аспектного отношения $A >> 1$. Однако, как было показано в статье [1], другое подобного типа соотношение (выражение для индуктивности плазмы), выведенное также в пределе $A >> 1$:

$$L_p = \mu_0 R_0\left(\ln\left(\frac{8R_0}{ak^{1/2}}\right) - 2 + \frac{l_i}{2}\right) \tag{16}$$

оказывается приемлемым уже при $A \geq 1{,}5$ и $k \leq 2$—$2{,}2$ (см. приведённую в [1] таблицу, где сравниваются значения индуктивности по соотношению (16) и по более сложной зависимости из работы [20], выведенной для произвольных значений аспектного отношения и вытянутости плазмы). Это позволяет надеяться, что и соотношение (15) даёт приемлемую оценку равновесного поля для параметров Глобус-3 (при $A \geq 1{,}5$ и $k \leq 2$—$2{,}2$). Отметим, что в ряде других системных кодов (PROCESS [17, 21], TREND [22]) используется менее точное выражение, не содержащее явно вытянутости плазмы, а именно

$$B_{eq} = \frac{\mu_0 I_p}{4\pi}\left(\ln\left(\frac{8R_0}{a}\right) - 1{,}5 + \beta_p + \frac{l_i}{2}\right). \tag{17}$$

ЗАВИСИМОСТЬ ЗАЗОРА МЕЖДУ ЦЕНТРАЛЬНЫМ СОЛЕНОИДОМ И ПЛАЗМОЙ ОТ БОЛЬШОГО РАДИУСА

В сферических токамаках с тёплыми обмотками и соленоидом, намотанным на центральную часть тороидальной обмотки, между ЦС и плазмой на внутреннем обводе располагаются вакуумная камера, первая стенка, скрэп-слой и конструктивные зазоры. На их толщину влияет множество факторов, связанных со сценарием разряда, прочностью и устойчивостью камеры, типом покрытия и охлаждения первой стенки и т.д.

При параметрическом анализе используется упрощённое описание суммарного зазора $\Delta_{CS—PL}$ с использованием опыта создания сферических токамаков, готовыми решениями в уже реализованных проектах и выделением главного фактора — зависимости от большого радиуса плазмы R_0. На рис. 4 показаны точки $\Delta_{CS—PL}$ и R_0 для установок Глобус-М2, ST40, MAST-U и NSTX-U, которые близки к линейной зависимости вида

$$\Delta_{CS—PL} \approx (0{,}08—0{,}1)R_0. \qquad (18)$$

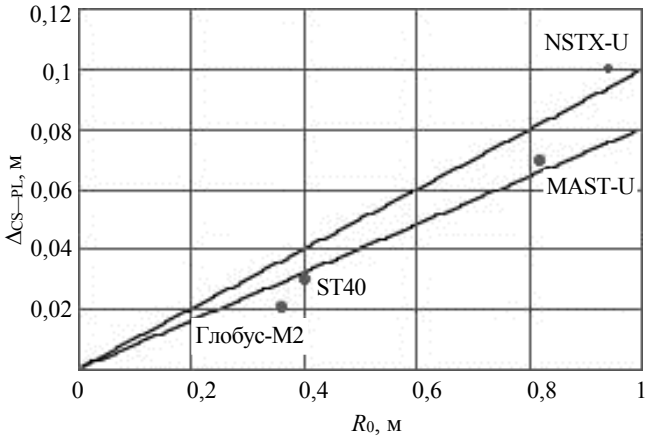


Рис. 4. Зависимость зазора соленоид—плазма $\Delta_{CS—PL}$ от большого радиуса R_0 для токамаков Глобус-М2, ST40, MAST-U, NSTX-U

Величина зазора для Глобус-М2 существенно меньше показанной на рисунке линейной зависимости. Это может быть связано со сравнительно небольшой длительностью разряда в Глобус-М2 (<1 с) [1] по сравнению с существенно большей проектной длительностью разряда в ST40 (1—3 с), MAST-U (2—5 с) и NSTX-U (5—8 с) [2]. А также с тем, что значение тока плазмы в Глобус-М2 (≤0,5 МА) меньше проектных значений I_p в ST40, MAST-U и NSTX-U (≤2 МА).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ, ОГРАНИЧЕНИЯ И ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ, ПРИНЯТЫЕ ПРИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ ГЛОБУС-3

Приняты следующие ограничения на параметры сферического токамака Глобус-3:

— большой радиус: 0,36 м < R < 1 м (ограничение сверху связано с условием размещения установки в зале Глобус, снизу — со значением большого радиуса в установках Глобус-М, Глобус-М2);

— аспектное отношение $A \le 1{,}8$ (примерное ограничение сверху для сферических токамаков);

— вытянутость сечения плазмы $k_x \le 2$ (в расчёте на рутинное проведение экспериментов);

— состав плазмы: рабочий газ — водород, основная примесь — углерод, эффективный заряд плазмы $Z_{эф} = 1{,}6$;

— допускается увеличенное значение коэффициента Эйджимы $C_{Ejima} = 0{,}5—0{,}6$ при оценке резистивных затрат потока с целью учесть изменение полоидального потока на стадии создания условий для пробоя и на начальной стадии разряда плазмы;

— значение концентрации плазмы на плато разряда выбирается на уровне ≤0,5 от предела Гринвальда;

— максимальное магнитное поле на оси центрального соленоида определяется ограничениями по нагреву проводника и по прочности соленоида (13). Соленоид намотан на тороидальную обмотку;

— минимальное значение тороидального магнитного поля на оси плазмы $B_{t0} \ge 1{,}5$ Тл;

— зависимость зазора между соленоидом и плазмой (где размещаются вакуумная камера, первая стенка, скрэп-слой и конструктивные зазоры) от большого радиуса принята в виде $\Delta_{CS—PL} \approx 0{,}08R_0$;

— для времени заведения тока в соленоид и тороидальную обмотку приняты соотношения $(0{,}5—1)\tau_{CS}$ и $(0{,}5—1)\tau_{TF}$, при этом нижняя граница соответствует форсированному варианту заведения тока;

— максимальная мощность дополнительного нагрева плазмы P_{AUX} = 5—8 МВт; к.п.д. систем нагрева 40%;

— максимальная суммарная активная мощность, потребляемая от сети основными подсистемами (тороидальной обмоткой, центральным соленоидом и системами нагрева плазмы), $P_\Sigma \le 100$ МВт;

— материал ЭМС — сплавы меди. Исходная температура тороидальной обмотки и соленоида 20 ºС («тёплая медь») и 77 К ≈ –196 ºС (медь, предварительно захоложенная до азотных температур). Максимально допустимая температура меди в конце импульса ≤100 ºС;

— для коэффициента заполнения медью геометрического объёма обмоток тороидального поля и соленоида принято значение $k_{CS} = k_{TF} = 0{,}8$, остальной объём обмотки занят изоляцией и каналами охлаждения. Отметим, что для Глобус-М2 коэффициент заполнения около 0,7 [1], в проекте ARIES-ST [10] он около 0,85.

В качестве целевой функции выбраны длительность плато тока плазмы $\Delta t_{\text{plateau}}$ при дополнительном нагреве и её отношение ко времени выравнивания профилей параметров плазмы $\tau_{L/R}$ (желательно достижение $\Delta t_{\text{plateau}} \geq (1—3)\tau_{L/R}$).

ХАРАКТЕРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ГЛОБУС-3 С МЕДНОЙ ЭМС ОТ ТОРОИДАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ПРИНЯТЫХ ОГРАНИЧЕНИЯХ НА МАКСИМАЛЬНЫЕ МОЩНОСТЬ, ТЕМПЕРАТУРУ ПРОВОДНИКА И РАЗМЕРЫ ТОКАМАКА

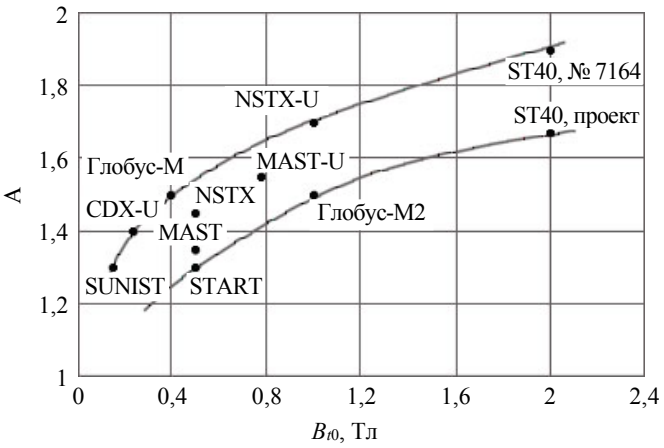


Рис. 5. Характер изменения аспектного отношения A при увеличении тороидального магнитного поля B_{t0}. Данные [2, 14, 25] и сайта www.tokamak.info

По мере увеличения тороидального магнитного поля в сферических токамаках растёт и аспектное отношение (рис. 5). Так, уже при уровне поля $B_{t0} = 1$ Тл в проектах MAST-U и NSTX-U аспектное отношение увеличивается [2, 12] до $A = 1{,}55$ и 1,7 соответственно, а при поле $B_{t0} = 3$ Тл в ST40 ожидается $A = 1{,}67$. На рис. 5 также показано положение одного из разрядов токамака ST40 (№ 7164 из работы [23]) в координатах A, B_{t0}.

В этой ситуации для токамака Глобус-3 при значении тороидального поля $B_{t0} \geq 1{,}5$ Тл принят диапазон аспектных отношений $A = 1{,}6—1{,}8$, где верхнее значение соответствует условной границе по аспектному отношению, принятому для сферических токамаков.

Отметим очень высокую степень вытянутости сечения плазмы в установках NSTX-U и MAST-U ($k = 2{,}75—2{,}5$ [2]). В отличие от этих проектов в Глобус-3 принято существенно меньшее значение максимальной вытянутости $k_{95} \approx 1{,}8$ по причинам, изложенным в начале статьи.

Далее приводится анализ параметров Глобус-3 с электромагнитной системой на основе сплавов меди:

— при значении тороидального магнитного поля на оси плазмы $B_{t0} = 1{,}5$, 2 и 3 Тл;

— для вариантов «тёплой» ЭМС (начальная температура меди 20 ºС), а также ЭМС, предварительно захоложенной до начальной температуры 77 К.

Отметим, что во всех рассмотренных далее вариантах параметров Глобус-3 плотность тока по проводнику существенно превышает 30 МА/м^2 (иначе геометрические размеры токамака превысили бы допустимые) и в ходе разряда ЭМС разогревается по закону, близкому к адиабатическому. В этом случае оказалось, что при определении параметров установки наиболее важны именно инженерные ограничения: предельный нагрев меди до 100 ºС, предельное потребление мощности основными энергоёмкими подсистемами (ОТП, ЦС, системы нагрева) — не более 100 МВт, а также длительное плато разряда $\Delta t_{\text{plateau}} > \tau_{L/R}$.

Плазменные характеристики разряда при такой постановке задачи входят фактически только через резистивное напряжение U_{res}, определяющее затраты потока на плато разряда. ток плазмы I_{p}, влияющий на затраты потока на стадии подъёма тока плазмы и на длительность подъёма тока, и время установления профилей плазмы $\tau_{L/R}$.

Принят наиболее изученный гибридный сценарий разряда с индуктивным стартом и подъёмом тока плазмы и затем переходом на частично неиндуктивный сценарий с суммарной долей $f_{\text{BS}} + f_{\text{CD}} < 1$ на плато тока плазмы.

Отметим, что хорошему удержанию плазмы соответствуют низкое резистивное напряжение U_{res} и большие значения температуры плазмы T, а также времени $\tau_{L/R}$ (так как $\tau_{L/R} \propto T^{3/2}$). В результате длительность плато разряда при выполнении баланса потока может быть (и должна быть из-за требования обеспечения $\Delta t_{\text{plateau}} > \tau_{L/R}$) увеличена. Но при этом начинает работать ограничение по нагреву проводника обмотки тороидального поля или центрального соленоида.

С другой стороны, при хорошем удержании плазмы, казалось бы, можно уменьшить размеры установки и сделать её более компактной. Но тогда для создания нужного тороидального магнитного поля и большого запаса полоидального магнитного потока необходимо увеличивать плотность тока в цен-

тральной части ОТП и в ЦС, что приводит как к более быстрому разогреву обмоток до предельно допустимой температуры, так и к большей мощности, потребляемой ОТП и ЦС. В этом случае можно начинать разрядный импульс с предварительно захоложенной ЭМС, что позволяет увеличить время разогрева обмоток и уменьшить потребление мощности, но оставляет проблемы с балансом потока.

Взаимодействие указанных факторов усложняет процедуру поиска приемлемых вариантов параметров установки Глобус-3 и заставляет ещё раз обратить внимание на используемые скейлинги для времени удержания энергии плазмы τ_E. Пессимистические скейлинги должны привести к низким значениям температуры плазмы, меньшим $\tau_{L/R}$, но и к более короткому плато разряда (из-за большого U_{res}). При более оптимистических скейлингах τ_E имеют место большие температура плазмы и время $\tau_{L/R}$, но при этом и плато разряда может быть увеличено.

Упомянутые термины «пессимистический» и «оптимистический» скейлинг τ_E поясним на примере данных, приведённых в табл. 3. Её цель — предварительный отбор скейлингов, которые будут использованы далее, при более подробном анализе параметров Глобус-3. Приведём значения времени удержания энергии плазмы по разным скейлингам для следующего варианта параметров: $B_{t0} = 1{,}5$ Тл, $R_0 = 0{,}67$ м, $a = 0{,}37$ м, $A = 1{,}8$, $k_{95} = 1{,}8$, $I_{\text{p}} = 1{,}5$ МА, $P_{\text{AUX}} = 6$ МВт, $n_e = 1{,}4 \cdot 10^{20}$ м$^{-3}$ (0,5 от предела Гринвальда).

Т а б л и ц а 3. **Сопоставление скейлингов времени удержания энергии плазмы при $B_{t0} = 1{,}5$ Тл**

Скейлинг	ИТЭР, $H_{y,2} = 1$	ИТЭР, $H_{y,2} = 1{,}4$	Globus-2021	NSTX	Petty	Hybrid
τ_E, мс	55	77	137	83	36	73

Как следует из табл. 3, при поле $B_{t0} = 1{,}5$ Тл к «пессимистическим», приводящим к очень низкому времени удержания энергии плазмы, можно отнести скейлинги Petty [24] и ITER [25] (при $H_{y,2} = 1$); к весьма «оптимистическому» — скейлинг Globus-2021 [26]. Скейлинги ITER (при $H_{y,2} = 1{,}4$) и NSTX [24] приводят при указанных параметрах к примерно одинаковым значениям τ_E (77 и 83 мс). Отметим, что при указанных параметрах использование гибридного скейлинга Hybrid (интерполяция по величине аспектного отношения от скейлинга NSTX ($A \le 1{,}67$) к скейлингу Petty ($A \ge 2{,}5$ [1, 24]), формально дающего близкое время жизни (73 мс) и описывающего плавный переход от малых значений аспектного отношения к большим, недостаточно обосновано.

В качестве основной зависимости для времени удержания энергии плазмы далее выбран скейлинг NSTX. Его область применимости по аспектному отношению $A \le 1{,}7$ и для параметров NSTX-U с аспектным отношением $A = 1{,}7$, этот скейлинг приводит к значениям τ_E, близким к проектным (см. соответствующее сопоставление скейлингов в [2]). Выбор скейлинга NSTX в качестве базового представляется разумным, поскольку область поиска параметров Глобус-3 ограничена сверху по аспектному отношению значениями $A \le 1{,}7$—$1{,}8$.

Скейлинг Globus-2021 был создан на базе данных сферических токамаков START, MAST, NSTX, Глобус-М и Глобус-М2 — установок с аспектным отношением $A \le 1{,}5$ и тороидальным полем $B_{t0} \le 0{,}5$ Тл. Он хорошо описывает также эксперименты в Глобус-М2, в котором аспектное отношение прежнее ($A = 1{,}5$), а тороидальное поле увеличено до 0,8 Тл. Но этот скейлинг в отличие от других, указанных в табл. 4, не содержит явной зависимости от аспектного отношения (или от обратной величины $\varepsilon = A^{-1}$), в то время как остальные скейлинги демонстрируют уменьшение τ_E с ростом A. В этом смысле возможность экстраполяции скейлинга Globus-2021 на значения аспектного отношения $A = 1{,}6$—$1{,}8$ не вполне ясна. Кроме отсутствия зависимости от ε, отметим довольно сильную зависимость скейлинга Globus-2021 от большого радиуса ($\propto R^{2{,}66}$).

Скейлинг NSTX содержит явную зависимость от аспектного отношения ($\propto \varepsilon^{0{,}58}$), несколько меньшую зависимость от большого радиуса ($\propto R^{1{,}97}$ вместо $\propto R^{2{,}66}$ у скейлинга Globus-2021) и более сильную зависимость от вводимой мощности нагрева ($\propto P_{\text{AUX}}^{-0{,}73}$ вместо $\propto P_{\text{AUX}}^{-0{,}58}$ у скейлинга Globus-2021), что в сумме приводит к худшему удержанию плазмы, чем при использовании скейлинга Globus-2021.

Далее параметры Глобус-3 будут оценены по нескольким скейлингам:

— NSTX (базовый);

— Globus-2021 (оценка сверху);

— ITER с $H_{y,2} > 1$ (сопоставление с базовым).

В задаче поиска приемлемых вариантов присутствует несколько ограничений:

— на большой радиус (≤1 м);

— на максимальную температуру меди (≤100 ºС);

— на максимальную потребляемую мощность (≤100 МВт суммарно в ОТП, ЦС и системах нагрева плазмы);

— на запас полоидального магнитного потока: его должно хватить на сценарий разряда заданной длительности.

Из общих соображений можно ожидать, что при низком тороидальном магнитном поле ($B_{t0} \sim 1{,}5$ Тл) будут работать только ограничения на максимальную температуру и на баланс потока, в то время как при большом поле ($B_{t0} \sim 3$ Тл) добавляется ограничение по мощности питания. При этом снижение мощности питания путём уменьшения плотности тока в обмотках ОТП и ЦС может задействовать и ограничение на размеры установки.

Так, для экспериментов на Глобус-М2 при тороидальном магнитном поле $B_{t0} \approx 0{,}8$ Тл потребляемая мощность не превышает 20 МВт, а длительность разряда ограничивается запасом магнитного потока и нагревом проводника, в то время как в токамаке ST40 переход к значению поля $B_{t0} \approx 3$ Тл из-за ограничения по мощности и нагреву обусловливает необходимость предварительного захолаживания электромагнитной системы перед разрядным импульсом. Но и в этом случае длительность плато тока ограничивается на уровне ~1 с разогревом проводника и запасом потока.

Варианты параметров Глобус-3 с «тёплой» медью в ЭМС с полем B_{t0} = 1,5 Тл (табл. 4). Обозначения в таблице:

— j_{TFc}, j_{CSc} — конструктивные максимальные плотности тока в центральном керне ОТП и в ЦС. Плотность тока по проводнику пересчитывается с помощью коэффициентов заполнения;

— p_{AUX} — удельная плотность мощности нагрева, вводимая в плазму, $p_{AUX} = P_{AUX}/S_{||}$; $S_{||}$ — площадь боковой поверхности плазмы;

— P_{sup0} — суммарная мощность питания ОТП и ЦС в момент пробоя плазмы (соленоид полностью заряжен);

— P_{supe} — суммарная мощность питания ОТП, ЦС и системы нагрева плазмы в конце плато (соленоид полностью или частично перемагничен);

— T_{TF0}, T_{CS0}, T_{TFe}, T_{CSe} — начальная (0) и конечная (e) температура центрального керна тороидальной обмотки и ЦС;

— Ψ_{CS0}, Ψ_{CSe}, — начальное и конечное значение полоидального магнитного потока в ЦС.

Т а б л и ц а 4. **Параметры Глобус-3 при B_{t0} = 1,5 Тл, k_{95} = 1,8 и $T_{TF0} = T_{CS0}$ = 20 ºС**

Параметр	Вариант			
	1	2	3	4
A	1,6	1,8	1,8	1,8
j_{TFc}, МА/м^2	45	45	45	45
j_{CSc}, МА/м^2	120	120	120	120
p_{AUX}, МВт/м^2	0,15	0,4	0,4	0,15
Скейлинг τ_E	NSTX	NSTX	ИТЭР, $H_{y,2} = 2$	Globus-2021
R_0, м	0,93	0,65	0,65	0,65
a, м	0,58	0,36	0,36	0,36
I_p, МА	1,5	1,5	1,5	1,5
q_{95}	8,5	4	4	4
P_{AUX}, МВт	4,6	5,4	5,4	2,0
P_{sup0}, МВт	100	52	52	52
P_{supe}, МВт	83	54	60	45
T_{TFe}, ºС	88	80	100	80
T_{CSe}, ºС	52	83	80	80
Ψ_{CS0}, Вб	1,3	1,0	1,0	1,0
Ψ_{CSe}, Вб	–0,4	–0,55	–0,65	–0,54
$\Delta t_{plateau}$, с	3,5	3,5	3,5	3,5
$\tau_{L/R}$, с	5,3	3	2,9	3,6
n_e, 10^{20} м$^{-3}$	0,7	1,5	1,5	1,5
T_n, кэВ	2,1	2,4	2,2	2,7
τ_E, мс	150	84	78	230
$f_{BS} + f_{CD}$	0,57	0,52	0,49	0,43
U_{res}, В	0,1	0,14	0,16	0,15

Некоторые выводы по данным табл. 4:

— при значении поля B_{t0} = 1,5 Тл и длительности плато разряда ~3,5 с низкому аспектному отношению (A = 1,6, вариант 1) соответствуют очень большие размеры установки (R_0 ~ 0,9—1 м). Для снижения общих размеров установки приходится идти либо на более короткий импульс, либо на уменьшение малого радиуса плазмы. Для сравнения приведён вариант 2 с аспектным отношением A = 1,8, при котором большой радиус плазмы уже существенно меньше (R_0 ≈ 0,65 м). Поэтому во всех последующих вариантах принято максимально допустимое значение A = 1,8;

— изменение скейлинга τ_E: скейлинг ИТЭР с коэффициентом улучшения удержания $H_{y,2}$ = 2 приводит примерно к тем же параметрам, что и скейлинг NSTX (см. варианты 2 и 3);

— при использовании «тёплой» меди длительность плато тока плазмы $\Delta t_{\text{plateau}}$ масштаба 3,5 с, что близко к характерному времени установления профилей плазмы $\tau_{L/R}$. При этом основное ограничение на параметры связано именно с нагревом. Имеется запас по потоку (нет полного перемагничивания соленоида). Поэтому некоторого увеличения длительности разряда можно ожидать в разрядах с предварительно захоложенной медью;

— с целью снижения резистивного напряжения на плато тока в плазму необходимо вводить довольно большую мощность нагрева (5—6 МВт, что соответствует удельной мощности нагрева p_{AUX} = 0,4 МВт/м^2). Доля неиндуктивного тока $f_{\text{BS}} + f_{\text{CD}}$ во всех вариантах табл. 4 около 0,5. Однако очень сильно увеличивать удельную мощность нежелательно из-за опасений, связанных с взаимодействием «плазма—стенка», которое может привести к преждевременному срыву разряда. Поэтому в рамках проводимого параметрического анализа будем ограничивать сверху значение p_{AUX} на уровне 0,4 МВт/м^2;

— величина удельной мощности нагрева может быть понижена при очень хорошем удержании плазмы. Эта ситуация иллюстрируется вариантом 4 со скейлингом Globus-2021. Удельная мощность нагрева для него существенно меньше (p_{AUX} = 0,15 МВт/м^2), абсолютная величина мощности нагрева небольшая (P_{AUX} ≈ 2 МВт). И хотя значение времени удержания плазмы очень велико (~200 мс), длительность разряда увеличивается довольно слабо (до 3,5 с) из-за ограничения по нагреву ЭМС.

Варианты параметров Глобус-3 с захоложенной медью в ЭМС с полем B_{t0} = 1,5 Тл (табл. 5). При переходе к вариантам с захоложенной медью (до 77 К) учтено, что время запитывания ОТП и ЦС существенно увеличивается обратно пропорционально снижению сопротивления этих обмоток, а время вывода тока из ЦС и ОТП меньше времени запитывания в силу их разогрева во время разряда.

Т а б л и ц а 5. **Параметры Глобус-3 при B_{t0} = 1,5 Тл, k_{95} = 1,8 и $T_{\text{TF0}} = T_{\text{CS0}}$ = 77 К**

Параметр	Вариант		
	5	6	7
A	1,8	1,8	1,8
j_{TFc}, МА/м^2	65	65	65
j_{CSc}, МА/м^2	100	110	110
p_{AUX}, МВт/м^2	0,4	0,4	0,2
Скейлинг τ_E	NSTX	ИТЭР, $H_{y,2}$ = 2	Globus-2021
R_0, м	0,66	0,63	0,63
a, м	0,37	0,35	0,35
I_{p}, МА	1,5	1,5	1,5
q_{95}	4	4	4
P_{AUX}, МВт	5,6	5,1	2,5
P_{sup0}, МВт	9	8	8
P_{supe}, МВт	61	78	72
T_{TFe}, ºС	88	100	100
T_{CSe}, ºС	–153	–24	–25
Ψ_{CS0}, Вб	1,3	1,2	1,2
Ψ_{CSe}, Вб	–0,74	–1,0	–1,0
$B_{\text{CS0}}/B_{\text{CSmax}}$, Тл	10/11	10/10,8	10/10,8
$\Delta t_{\text{plateau}}$, с	12	12,5	12,5
$\tau_{L/R}$, с	4,2	3,5	4,4
n_e, 10^{20} м$^{-3}$	1,0	1,0	1,0
T_n, кэВ	3,0	2,8	3,4
τ_E, мс	72	63	145
$f_{\text{BS}} + f_{\text{CD}}$	0,67	0,63	0,5
U_{res}, В	0,07	0,10	0,11

Выводы из данных табл. 5:

— при захолаживании меди перед разрядом может быть достигнут выигрыш по длительности плато разряда в 3,5—4 раза: с $\Delta t_{\text{plateau}} = 3{,}5$ до 12—12,5 с;

— в разрядах с предварительным захолаживанием ЭМС возможно существенное (в 1,5 раза) увеличение конструктивной плотности тока в узкой части тороидальной обмотки: с $j_{\text{TFc}} = 45$ до 65 МА/м^2. Это позволяет несколько уменьшить размеры установки: с $R_0 = 65$ до 63 см;

— максимальная плотность тока в центральном соленоиде остаётся примерно той же (100—110 МА/м^2), но для увеличения запаса потока в центральном соленоиде становится важным увеличение максимального поля на оси соленоида: с $B_{\text{CS0}} = 7{,}5$ до 10 Тл, что приводит к увеличению механических напряжений;

— при использовании скейлинга времени удержания энергии плазмы Globus-2021, как и для случая «тёплой» ЭМС, возможно снижение мощности нагрева примерно вдвое (до $p_{\text{AUX}} = 0{,}2$ МВт/м^2). При этом время установления профилей параметров плазмы увеличивается до 4,4 с, но длительность разряда, определяемая нагревом ЭМС, остаётся той же, что и для других скейлингов τ_E.

Варианты параметров Глобус-3 с полем $B_{t0} = 2$ и 3 Тл. В табл. 6 приведены параметры Глобус-3 при значении тороидального магнитного поля $B_{t0} = 2$ Тл (варианты 8 и 9 с «тёплой» медью, варианты 10 и 11 с захоложенной медью) и при $B_{t0} = 3$ Тл (вариант 12 с захоложенной медью).

Т а б л и ц а 6. **Параметры Глобус-3 при $B_{t0} = 2$ и 3 Тл, варианты с «тёплой» и захоложенной медью (Т соответствует «тёплой» ЭМС, Х — захоложенной)**

Параметр	Вариант				
	8	9	10	11	12
	T	T	X	X	X
B_{t0}, Тл	2	2	2	2	3
T_{TF0}, ºС	20	20	–196	–196	–196
T_{CS0}, ºС	20	20	–196	–196	–196
A	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
j_{TFc}, МА/м^2	40	45	64	55	55
j_{CSc}, МА/м^2	110	120	120	100	110
p_{AUX}, МВт/м^2	0,3	0,4	0,25	0,15	0,2
Скейлинг τ_E	NSTX	NSTX	NSTX	NSTX	NSTX
R_0, м	0,85	0,76	0,64	0,77	0,97
a, м	0,47	0,43	0,36	0,43	0,54
I_{p}, МА	1,5	1,8	1,5	1,6	2,4
q_{95}	7	5,2	5,2	6	7,5
P_{AUX}, МВт	7,0	7,5	3,3	3	6
P_{sup0}, МВт	91	81	9	12	25
P_{supe}, МВт	76	74	93	100	96
T_{TFe}, ºС	95	100	100	90	–56
T_{CSe}, ºС	76	70	100	10	–150
Ψ_{CS0}, Вб	1,7	1,4	1,1	1,6	2,8
Ψ_{CSe}, Вб	0,3	–0,3	–0,9	–1,4	0
$\Delta t_{\text{plateau}}$, с	4	3,5	12	16	8
$\tau_{L/R}$, с	8	10	6	7	24
n_e, 10^{20} м$^{-3}$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
T_n, кэВ	3,3	4,2	3,7	3,0	5,6
τ_E, мс	140	120	135	210	400
$f_{\text{BS}} + f_{\text{CD}}$	0,9	0,9	0,6	0,5	0,77
U_{res}, В	0,01	0,01	0,07	0,1	0,02

Приведём комментарии к данным табл. 6:

— для вариантов с $B_{t0} = 2$ Тл и «тёплой» магнитной системой рост тороидального магнитного поля приводит к увеличению габаритов установки. При этом условие достаточно большой длительности разряда ($\Delta t_{\text{plateau}} \geq \tau_{L/R}$) не выполнено. Достичь его можно только при предварительном захолаживании (см. варианты 10 и 11);

— при $B_{t0} = 3$ Тл при значении плотности $n_e = 1{\cdot}10^{20}$ м$^{-3}$ даже предварительное захолаживание не позволяет выполнить условие $\Delta t_{\text{plateau}} \geq \tau_{L/R}$ (см. параметры варианта 12). Значения $\Delta t_{\text{plateau}}$ и $\tau_{L/R}$ по расчётам сравниваются только при очень высокой плотности $n_e \geq 3{\cdot}10^{20}$ м$^{-3}$ (при этом $\Delta t_{\text{plateau}} \approx \tau_{L/R} \approx 11$ с), превышающей предел Гринвальда;

— несмотря на то, что при поле B_{t0} = 3 Тл в ходе разряда ЭМС продолжает оставаться в холодном состоянии (температура меди меньше 0 ºС в ходе всего разряда), потребление мощности (главным образом, тороидальной обмоткой) уже близко к допустимому пределу 100 МВт.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И СИСТЕМЫ ОГРАНИЧЕНИЙ В ПРОЕКТАХ ГЛОБУС-3 И ST40

В установке ST40 (проектные данные [25]: R_0 = 0,4 м, a = 0,24 м, I_p = 2 МА, k = 2,5, мощность нагрева 3—5 МВт) предполагается достижение рекордных для сферических токамаков параметров как по величине тороидального магнитного поля (B_{t0} до 3 Тл), так и по параметрам плазмы благодаря ожидаемому улучшению удержания плазмы с ростом поля при умеренной длительности разряда 1—2 с. В экспериментах на ST40 с «тёплой» электромагнитной системой уже получены значение поля B_{t0} = 2 Тл и длительность разряда в доли секунды. Достижение поля B_{t0} = 3 Тл ожидается в варианте с предварительным захолаживанием ЭМС до азотных температур.

Часть задач, стоящих перед проектом Глобус-3, близка к намеченным в ST40. Как показали расчёты по коду GLOBSYS (см. данные табл. 4—6), геометрические размеры Глобус-3 существенно больше, чем в ST40. Основные отличия подходов и системы ограничений в ST40 и Глобус-3, которые привели к такой разнице в параметрах:

— вытянутость сечения плазмы k принята на уровне 2,5 (ST40) и 1,8 (Глобус-3). В результате в ST40 ток плазмы «набирается» большей вытянутостью, в то время как в Глобус-3 — преимущественно за счёт увеличения размеров;

— затраты полоидального магнитного потока на стадии подъёма тока плазмы в ST40 существенно меньше, чем в Глобус-3, за счёт применения в ST40 схемы «merging compression» [27, 28];

— ограничение на потребляемую мощность в Глобус-3 существенно более жёсткое, чем в ST40. Фактически в ST40 ограничивается не мощность, а запасённая энергия. Это связано с различием в типе системы электропитания: сетевой в Глобус-3 и конденсаторной в случае ST40 (энергия W_C, запасённая в конденсаторной батарее ST40, составляет сотни МДж);

— предполагаемая длительность разряда в ST40 существенно меньше, чем ожидается в Глобус-3. Это снова связано с энергозапасом системы питания ST40. Так, при полной запасаемой энергии $W_C \sim$ 200 МДж и максимальной потребляемой мощности в конце разряда ~200 МВт длительность импульса может составить 1—2 с с учётом предварительного захолаживания ЭМС в начале разряда.

ВАРИАНТЫ ПАРАМЕТРОВ ГЛОБУС-3 С УМЕНЬШЕННОЙ ВЕЛИЧИНОЙ ТОКА ПЛАЗМЫ

Параметрические исследования, проведённые ранее, отталкивались от значений тока плазмы, магнитного поля и мощности удельного нагрева, необходимых для создания компактного нейтронного источника ($I_p \geq$ 1,5 МА, $B_{t0} \geq$ 1,5 Тл, $p_{AUX} >$ 0,4 МВт/м^2). Однако совместимость мощного нагрева плазмы с длительным поддержанием разряда в настоящее время неясна [29, 30], особенно в случае неохлаждаемых в ходе импульса внутрикамерных элементов. Это делает желательным анализ параметров Глобус-3 с более консервативным уровнем удельного нагрева $p_{AUX} <$ 0,3 МВт/м^2. Также, учитывая аргументы, представленные в работе [31], кажется разумным снижение абсолютной величины базового тока плазмы I_p в 1,5—2 раза.

Как показано в табл. 6, при указанных ограничениях и уровне тороидального магнитного поля B_{t0} = 3 Тл условие $\Delta t_{plateau} > \tau_{L/R}$ не достигается даже в случае предварительного захолаживания ЭМС. В этом смысле величина поля B_{t0} = 3 Тл находится за пределами параметров Глобус-3.

Поэтому возможен несколько иной подход к определению параметров следующего шага программы «Глобус». Базовые параметры предыдущих шагов:

— Глобус-М: B_{t0} = 0,4 Тл; I_p = 0,2—0,3 МА; $p_{AUX} \sim$ 0,1 МВт/м^2; $\Delta t_{plateau} \sim$ 0,1 с; $f_{BS} + f_{CD} \sim$ 0,1;

— Глобус-М2: B_{t0} = 0,8—1 Тл; I_p = 0,4—0,5 МА; $p_{AUX} \sim$ 0,15 МВт/м^2; $\Delta t_{plateau} \sim$ 0,5 с; $f_{BS} + f_{CD} \sim$ 0,2.

В рамках такого подхода возможен следующий набор параметров новой установки:

— Глобус-3: B_{t0} = 1,5—2 Тл; I_p = 0,8—1 МА; p_{AUX} ~ 0,2—0,3 МВт/м^2; $\Delta t_{plateau}$ ~ несколько секунд (ЭМС с «тёплой» медью) и ~10 с (ЭМС с предварительно захоложенной медью); $f_{BS} + f_{CD} > 0{,}6$—0,8.

Выбор базового значения тока плазмы I_p при таком подходе диктуется необходимостью эффективного поглощения вводимой мощности нейтральной инжекции. Если предположить, что в Глобус-3 будет использован инжектор с токамака Глобус-М2 [32], энергия быстрых нейтралов составит E_{NB} = 50 кэВ.

Были проведены расчёты поглощения и потерь мощности пучка быстрых нейтралов в плазме по коду NUBEAM. Зависимость прямых потерь основного компонента инжекции от центральной плотности электронов для сценария I_p = 0,8 МА, B_{t0} = 1,5 Тл при инжекции дейтерия с энергией 50 кэВ показана на рис. 6, *а*. На рисунке приведена оценка потерь с первой орбиты сверху, при этом считалось, что время потерь на перезарядку вне плазмы значительно меньше времени замедления. В результате частица, пересекающая границу плазмы, за короткое время перезаряжается на нейтральном газе и покидает плазменный шнур. Важно отметить, что нижняя оценка уровня потерь с первой орбиты, учитывающая только потери из-за попадания в стенку токамака, не превышает 0,01%.

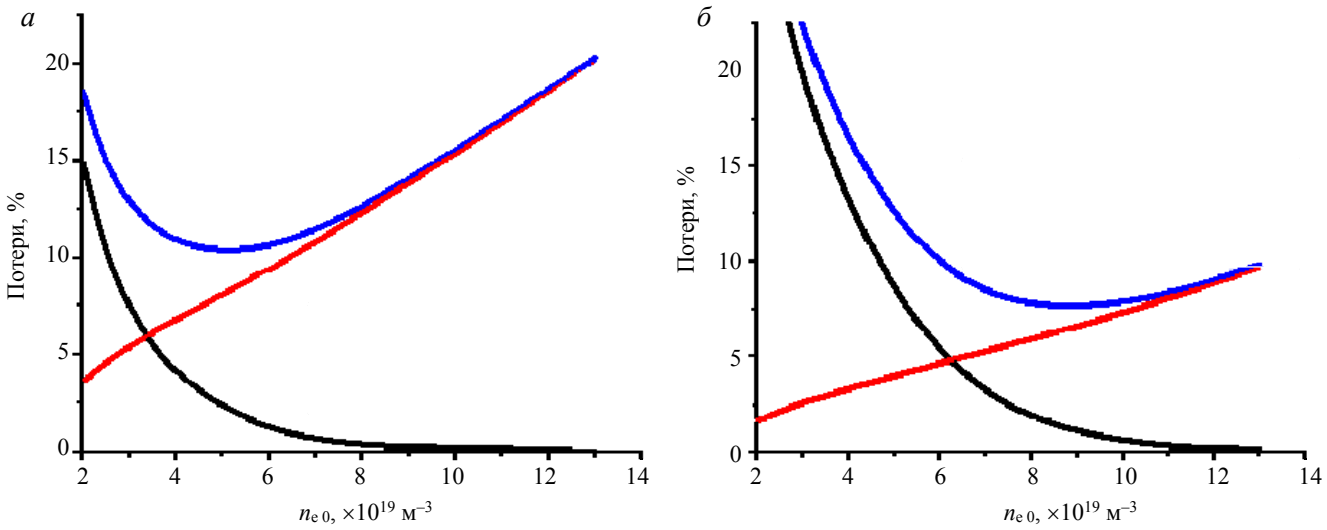


Рис. 6. Зависимость прямых потерь в токамаке Глобус-3 от центральной электронной плотности для случая инжекции дейтерия (*а*) и водорода (*б*) с энергией 50 кэВ: — потери на пролёт; — верхняя оценка потерь с первой орбиты; — суммарные потери

Видно, что потери на пролёт близки к нулю при центральной плотности выше 0,8·10^{20} м$^{-3}$. При этом потери с первой орбиты растут с увеличением плотности. Это связано с тем, что пучок перестаёт проникать внутрь плазменного шнура: всё больше частиц ионизуется вблизи границы плазмы, что приводит к росту потерь на перезарядку при пересечении границы плазмы. Минимум суммарных потерь соответствует значению центральной плотности ~0,5·10^{20} м$^{-3}$ и составляет примерно 10%.

Прямые потери для случая инжекции водорода с энергией 50 кэВ показаны на рис. 6, *б*. Характер представленных зависимостей совпадает с предыдущим случаем, однако поскольку при равных значениях энергии скорость атомов водорода выше, водородный пучок лучше проникает в центральную область плазмы. В связи с этим потери на пролёт при низкой плотности выше, однако с ростом плотности суммарный уровень потерь падает: минимальный уровень потерь составляет 7,5% и соответствует плотности ~0,9·10^{20} м$^{-3}$.

Для рассмотренных случаев при токе плазмы 0,8 МА прямые потери мощности инжекции не превышают 15% в широком диапазоне плотности плазмы 0,3·10^{20} < n_e < 0,8·10^{20} м$^{-3}$ при использовании как дейтериевого, так и водородного пучков. Условие разумной длины ионизации быстрых нейтралов при заданной энергии приводит к ограничению на плотность плазмы сверху, обеспечение приемлемого уровня потерь на пролёт — к ограничению снизу. Следует заметить, что потери на перезарядку, вносящие основной вклад в потери с первой орбиты в рассмотренных случаях, сильно падают при увеличении скорости инжектируемых частиц. Для уменьшения прямых потерь может быть предложено увеличение энергии инжекции дейтериевого пучка вплоть до 150 кэВ — технического предела для инжекторов с источниками на положительных ионах.

Расчёты также показали, что при B_{t0} = 1,5 Тл по мере уменьшения тока плазмы вплоть до значений 450—500 кА существенного роста потерь пучка не происходит. На рис. 7 показана зависимость потерь ионов с первой орбиты от тока плазмы в токамаке Глобус-3 для случая инжекции дейтерия и водорода с энергией 50 кэВ при центральной электронной плотности 10^{20} м$^{-3}$ и величине тороидального поля B_{t0} = 1,5 Тл. В этом смысле критическим значением тока плазмы относительно потерь пучка является $I_{\text{p min}} \simeq 450$ кА.

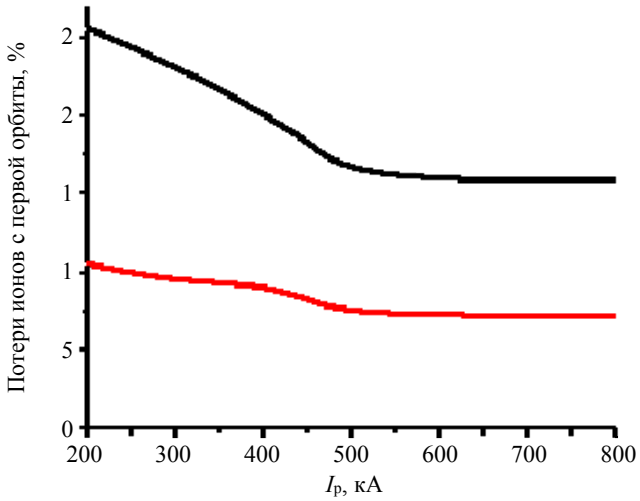


Рис. 7. Зависимость потерь ионов с первой орбиты от тока плазмы в токамаке Глобус-3 для случая инжекции дейтерия (——) и водорода (——) с энергией 50 кэВ при центральной электронной плотности 10^{20} м$^{-3}$

Следует отметить, что при значениях тока плазмы, принятых в вариантах 2—12 (см. табл. 4—6) значение запаса устойчивости q_{95} сравнительно невелико — $q_{95} \sim 4$—5. Переход к уменьшенным значениям I_p приводит при сохранении геометрии и поля к увеличению запаса устойчивости. В этом случае представляет интерес снова сопоставить параметры установки при использовании скейлингов энергетического времени жизни NSTX и Globus-2021. Как будет показано далее, в области больших значений q_{95} отличие времени жизни по скейлингам NSTX и Globus-2021 становится меньше, а параметры установки ближе.

Варианты параметров Глобус-3 при B_{t0} = 1,5 Тл и I_p = 0,8 МА. По мере уменьшения тока плазмы растёт запас устойчивости q_{95}, ожидаются более пикированные профили параметров плазмы, а также увеличение внутренней индуктивности l_i. В свою очередь, при больших l_i усложняется возможность достижения большой вытянутости плазмы. Поэтому в табл. 7 приведены параметры при двух значениях вытянутости сечения плазмы: k_{95} = 1,8 и 1,7.

Т а б л и ц а 7. **Параметры Глобус-3 при B_{t0} = 1,5 Тл и I_p = 0,8 МА, варианты с «тёплой» и захоложенной медью (Т соответствует «тёплой» ЭМС, Х — захоложенной)**

Параметр	Вариант				
	13	14	15	16	17
	Т	Т	Т	Х	Х
k_{95}	1,8	1,8	1,7	1,8	1,7
B_{t0}, Тл	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
T_{TF0}, °С	20	20	20	–196	–196
T_{CS0}, °С	20	20	20	–196	–196
A	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
j_{TFc}, МА/м^2	55	50	45	60	55
j_{CSc}, МА/м^2	100	110	120	105	105
p_{AUX}, МВт/м^2	0,2	0,15	0,2	0,2	0,2
Скейлинг τ_E	NSTX	Globus-2021	NSTX	NSTX	NSTX
R_0, м	0,64	0,66	0,70	0,60	0,63
a, м	0,38	0,39	0,41	0,35	0,37
q_{95}	9	9,3	9,0	8,5	8,0
I_p, МА	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
P_{AUX}, МВт	2,8	2,2	3,1	2,4	2,6
P_{sup0}, МВт	45	48	50	5	5
P_{supe}, МВт	43	40	45	40	42
T_{TFe}, °С	100	100	85	16	–10
T_{CSe}, °С	36	50	100	–60	–6
Ψ_{CS0}, Вб	0,63	0,7	0,78	0,54	0,61
Ψ_{CSe}, Вб	0	0,1	0,3	–0,47	–0,6
$\Delta t_{plateau}$, с	2,5	3	3	12	13
$\tau_{L/R}$, с	2,5	3	3,8	2,3	2,4
n_e, 10^{20} м$^{-3}$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
T_n, кэВ	2,0	2,2	2,5	2,1	2,1
τ_E, мс	70	106	94	66	69
$f_{BS} + f_{CD}$	0,84	0,85	0,99	0,79	0,76
U_{res}, В	0,03	0,02	0	0,04	0,05

В вариантах с меньшей вытянутостью несколько увеличиваются размеры установки, но, тем не менее, они остаются довольно умеренными: $R_0 \sim 0{,}64$—$0{,}7$ м, $a \sim 0{,}35$—$0{,}4$ м.

Важно, что при $B_{t0} = 1{,}5$ Тл и $I_p = 0{,}8$ МА согласно расчётам запас устойчивости довольно большой ($q_{95} \sim 8$—9) и становится возможным достижение доли неиндуктивного тока ~80% даже при довольно скромном нагреве плазмы ($p_{AUX} \le 0{,}2$ МВт/м^2, $P_{AUX} \sim 2$—3 МВт) для скейлингов как NSTX, так и Globus-2021.

В вариантах с «тёплой» ЭМС условие $\Delta t_{plateau} \ge \tau_{L/R}$ может быть достигнуто на уровне длительности плато тока ~2,5—3 с. Предварительное захолаживание ЭМС позволяет в расчётах достичь условия $\Delta t_{plateau} \ge 5\tau_{L/R}$.

Варианты параметров Глобус-3 при $B_{t0} = 2$ Тл и $I_p = 1$ МА (табл. 8). Если сопоставить данные табл. 7 и 8, то в вариантах с «тёплой» ЭМС рост тороидального поля с 1,5 до 2 Тл приводит к значительному увеличению размеров установки: с ~0,65 до ~0,9 м. При этом условие $\Delta t_{plateau} \ge \tau_{L/R}$ перестаёт выполняться: для вариантов 18 и 19 отношение $\Delta t_{plateau}/\tau_{L/R} \sim 0{,}6$. Возможность превышения указанного отношения восстанавливается при предварительном захолаживании ЭМС (см. вариант 20), для которого $\Delta t_{plateau}/\tau_{L/R} \sim 4$.

Таблица 8. **Параметры Глобус-3 при $B_{t0} = 2$ Тл и $I_p = 1$ МА, варианты с «тёплой» и захоложенной медью (Т соответствует «тёплой» ЭМС, Х — захоложенной)**

Параметр	Вариант		
	18	19	20
	Т	Т	Х
k_{95}	1,8	1,7	1,7
B_{t0}, Тл	2	2	2
T_{TF0}, ºС	20	20	–196
T_{CS0}, ºС	20	20	–196
A	1,7	1,7	1,7
j_{TFc}, МА/м^2	45	45	50
j_{CSc}, МА/м^2	105	105	150
p_{AUX}, МВт/м^2	0,15	0,15	0,15
Скейлинг τ_E	NSTX	NSTX	NSTX
R_0, м	0,89	0,89	0,76
a, м	0,52	0,52	0,44
q_{95}	13	12,5	10
I_p, МА	1,0	1,0	1,0
P_{AUX}, МВт	4	4	2,8
P_{sup0}, МВт	95	90	10
P_{supe}, МВт	92	90	70
T_{TFe}, ºС	100	100	90
T_{CSe}, ºС	100	100	–60
Ψ_{CS0}, Вб	1,3	1,3	1,0
Ψ_{CSe}, Вб	0,5	0,5	–0,4
$\Delta t_{plateau}$, с	3,5	3,5	20
$\tau_{L/R}$, с	6,5	6	5
n_e, 10^{20} м$^{-3}$	0,7	0,7	0,7
T_n, кэВ	2,4	2,4	2,7
τ_E, мс	160	155	145
$f_{BS} + f_{CD}$	1	1	0,8
U_{res}, В	0	0	0,03

Отметим, что при таких больших размерах установки снижение вытянутости плазмы с $k_{95} = 1{,}8$ до 1,7 (варианты 18 и 19) практически не сказывается на остальных параметрах установки и требует лишь небольшого снижения запаса устойчивости плазмы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа является продолжением статей [1, 2]. В [1] была изложена физическая модель для описания параметров сферических токамаков и проведено сопоставление с экспериментальными данными одного из разрядов токамака Глобус-М2. В [2] разработанная модель применена к разрядам на зарубежных токамаках NSTX, NSTX-U, MAST, MAST-U и ST40. Для этих установок, кроме верификации физической части разработанного кода GLOBSYS, приведены также оценки ряда инженерных подсистем.

В данной статье более подробно изложена инженерная часть кода GLOBSYS, а также проведён анализ параметров установки, являющейся дальнейшим развитием программы «Глобус», а именно установки Глобус-3.

Приведена идеология поиска параметров Глобус-3 при наличии ограничений, связанных с нагревом обмоток и потреблением мощности. Часть результатов очевидна: по физике для достижения длительного горения плазмы необходимы хорошее удержание плазмы и большая доля неиндуктивного тока. Инженерные ограничения участвуют в выборе параметров более сложным образом: в ряде случаев это перегрев обмоток, в других — суммарная мощность электропитания, в третьих — ограничение на запас потока в омическом соленоиде, в четвёртых — прочность элементов конструкции.

Проведён предварительный выбор параметров сферического токамака Глобус-3 для случаев старта с применением «тёплой» ЭМС, а также предварительно захоложенной до температуры жидкого азота. В дальнейшем при разработке конструкции «тёплой» или предварительно захоложенной ЭМС установки Глобус-3 следует учитывать механическое состояние проводника при его быстром, практически адиабатическом нагреве в течение импульса, которое может привести к дополнительным ограничениям на длительность плато тока плазмы.

По результатам проведённых параметрических исследований предлагается в качестве основы для дальнейшей проработки установки Глобус-3 принять варианты, приведённые в табл. 7, с тороидальным магнитным полем B_{t0} = 1,5 Тл и током плазмы I_p = 0,8 МА, а именно либо варианты 13—15 с «тёплой» ЭМС и длительностью плато тока плазмы ~3 с, либо варианты 16, 17 с предварительно захоложенной ЭМС и длительностью плато тока 12—13 с.

При бóльших значениях тороидального магнитного поля (2 Тл) размеры установки резко растут и приемлемым можно считать только вариант 20 с захоложенной ЭМС. При значениях тороидального поля B_{t0} = 3 Тл условие $\Delta t_{plateau} > \tau_{L/R}$ не достигается даже для предварительно захоложенной ЭМС.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (соглашение № 21-79-20133 от 24.03.2021 между РНФ и АО «НИИЭФА»). В работе была использована база данных уникальной научной установки «Сферический токамак Глобус-М», входящей в состав федерального центра коллективного пользования «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Минеев А.Б., Бондарчук Э.Н., Кавин А.А., Конин А.Ю., Родин И.Ю., Танчук В.Н., Филатов О.Г., Бахарев Н.Н., Жильцов Н.С., Курскиев Г.С., Киселёв Е.О., Минаев В.Б., Сахаров Н.В., Петров Ю.В., Тельнова А.Ю.** Инженерно-физическая модель (GLOBSYS) для следующего шага программы сферического токамака Глобус. Описание модели и сопоставление с данными разряда Глобус-М2. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып. 3, с. 37.
2. **Минеев А.Б., Бондарчук Э.Н., Кавин А.А., Конин А.Ю., Родин И.Ю., Танчук В.Н., Трофимов В.А., Филатов О.Г., Бахарев Н.Н., Жильцов Н.С., Курскиев Г.С., Киселёв Е.О., Минаев В.Б., Сахаров Н.В., Петров Ю.В., Тельнова А.Ю.** Инженерно-физическая модель (GLOBSYS) для следующего шага программы сферического токамака Глобус. Верификация кода GLOBSYS по данным установок NSTX, NSTX-U, MAST, MAST-U, ST40. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып. 4, с. 43.
3. **Stambaugh R.D., Chan V.S., Miller R.L., Schaffer M.J.** The spherical tokamak path to fusion power. — Fusion Technology, 1998, vol. 33, p. 1.
4. **Малков М.П.** Справочник по физико-техническим основам криогеники. — М.: Энергоатомиздат, 1985 (тез.), 2018, т. 41, вып. 2, с. 59.
5. **White G.K., Collocott S.J.** Heat capacity of reference materials: cu and W. — J. Phys. Chem. Ref. Data, 1984, vol. 13, № 4, p. 1251.
6. **Хвостенко П.П., Анашкин И.О., Бондарчук Э.Н., Инютин Н.В., Крылов В.А., Левин И.В., Минеев А.Б., Соколов М.М.** Экспериментальная термоядерная установка токамак Т-15МД. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 1, с. 15; **Khvostenko P.P., Anashkin I.O., Bondarchuk E.N., Injutin N.V., Krylov V.A., Levin I.V., Mineev A.B., Sokolov M.M.** Experimental thermonuclear installation tokamak T-15MD. — Physics of Atomic Nuclei, 2020, vol. 83, p. 1037.
7. **Зарва Д.Б.** Техническое, математическое и информационное обеспечение системы управления источниками импульсного электропитания токамака КТМ. Диссертация на соискание учёной степени к.т.н. Томск, 2021.
8. **Зарва Д.Б., Дериглазов А.А., Батырбеков Э.Г., Тажибаева И.Л., Павлов В.М., Ли А.М., Мезенцев А.А., Меркулов С.В., Голобоков Ю.Н.** Электротехнический комплекс системы импульсного электропитания токамака КТМ. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 2, с. 59.
9. **Шпанский Ю.С., Кутеев Б.В., Лукаш В.Э., Петров В.С.** Магнитная система нейтронного источника ТИН-СТ. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2010, вып. 4, с. 40.
10. **Miller R.L. & the ARIES Team.** ARIES-ST design point selection. — Fusion Engineering and Design, 2003, vol. 65, p. 199.
11. **Ono M., Chrzanowski J., Dudek L., Gerhardt S., Heitzenroeder P. et al.** Progress toward commissioning and plasma operation in NSTX-U. — Nucl. Fusion, 2015, vol. 55, 073007.
12. **Menard J.E., Gerhardt S., Bell M., Bialek J., Brooks A. et al.** Overview of the physics and engineering design of NSTX upgrade. — Nuclear Fusion, 2012, vol. 52, p. 083015. See also: **Menard J.E. et al.** Overview of the physics and engineering design of NSTX upgrade. — In: 38th IEEE International Conf. on Plasma Science (ICOPS) and 24th Symp. on Fusion Engineering (SOFE). Chicago, IL, United States, 2011.

13. **Gryaznevich M. and Tokamak Energy Ltd. Physics Team.** Faster Fusion: ST40, engineering, commissioning, first results. — 20th ISTW-2019, 29 Oct 2019, ENEA Frascati.
14. **Gryaznevich M., Asunta O., Tokamak Energy Ltd. Team.** Overview and status of construction of ST40. — Fusion Engineering and Design, 2017, vol. 123, p. 177.
15. **Neumeyer C., Avasarala S., Chrzanowski J., Dudek L., Fan H., Hatcher R., Heitzenroeder P., Menard J., Ono M., Ramakrishnan S., Titus P., Woolley R., Zhan H.** National Spherical Torus Experiment (NSTX) Center Stack Upgrade. Preprint PPPL-4464. — SOFE, 2009.
16. **Menard J., Fredrickson E., Gates D., Goldston R., Kaye S., Kugel H., Maingi R., Maqueda R., Mueller D., Paul S., Sabbagh S.A., Stutman D.** Flux consumption optimization and the achievement of 1 MA discharges on NSTX. — In: 27th EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys. Budapest, 12—16 June 2000, ECA, vol. 24B (2000), p. 1441.
17. **Knight P.J., Kovari M.D.** A User Guide to the PROCESS Fusion Reactor Systems Code. Version 12, January 2016.
18. **Глухих В.А., Беляков В.А., Минеев А.Б.** Физико-технические основы управляемого термоядерного синтеза. Учебное пособие для вузов. — СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2006.
19. **Gryaznevich M., Bevir V., Knight P. et al.** Plasma formation and volt-second consumption in spherical tokamaks. — In: Intern. Workshop on Spherical Torus'97 (STW-97). St-Petersburg, Russia, 3—5 September, 1997.
20. **Hirshman S.P., Neilson G.P.** External inductance of an axisymmetric plasma. — Phys. Fluids, 1986, vol. 29, p. 790.
21. **Kovari M., Kemp R., Knight P.J., Ward D.J.** The PROCESS Fusion Reactor Systems Code. — PROCESS Summary Paper. DRAFT 22/08/2011, 2011.
22. **Hartmann T.** Development of a Modular Systems Code to Analyse the Implications of Physics Assumptions on the Design of a Demonstration Fusion Power Plant. PhD, 2013.
23. **Gryaznevich M. and Tokamak Energy Ltd. Team.** Experiments on ST40 Towards Burning Plasma Conditions. FEC, 2021, OV/P 1377.
24. **Menard J.E.** Compact steady-state tokamak performance dependence on magnet and core physics limits. — Phil. Trans. Royal Society, 2019, A 377, 20170440.
25. **ITER Physics** Expert Group on Confinement and Transport and Confinement Modelling and Database, ITER Physics Basis. Chapter 2: Plasma confinement and transport. — Nucl. Fusion, 1999, vol. 39, p. 2175.
26. **Kurskiev G.S., Bakharev N.N., Chernyshev F.V., Gusev V.K., Khromov N.A., Kiselev E.O., Krikunov S.V., Minaev V.B., Miroshnnikov I.V., Novokhatskii A.N., Zhiltsov N.S., Mukhin E.E., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Shulyatiev K.D., Shchegolev P.V., Skrekel O.M., Telnova A.Yu., Tkachenko E.E., Tukhmeneva E.A., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Yu., Varfolomeev V.I., Voronin A.V.** Energy confinement in the spherical tokamak Globus-M2 with a toroidal magnetic field approaching 0.8 T. — In: IAEA Fusion Energy Conference, IAEA-EXC-P7, 2021.
27. **Gryaznevich M.P., Sykes A.** Merging-compression formation of high temperature tokamak plasma. — Nucl. Fusion, 2017, vol. 57, № 7, p. 072003.
28. **Buxton P.F., Asunta O., Gryaznevich M.P., McNamara S. and Tokamak Energy Ltd. Team.** Merging compression start-up prediction for ST40. — In: 44th EPS Conf. on Plasma Physics. Belfast, Northern Ireland, 2017, vol. 4, p. 156.
29. **Mirnov S.V.** P_H/S-tokamak's limit as a result of the plasma sheath breakdown. — Plasma Phys. Contr. Fus., 2016, vol. 58, 022001.
30. **Kuteev B.V., Sergeev V.Yu.** Discharge duration limits of temporary tokamaks and stellarators. — Nucl. Fusion, 2020, vol. 60, № 4, p. 046017.
31. **Мирнов С.В.** Имеют ли сферические токамаки термоядерное будущее? — Физика плазмы, 2012, т. 38, № 12, с. 1011—1021.
32. **Minaev V.B., Gusev V.K., Sakharov N.V. et al.** Spherical tokamak Globus-M2: design, integration, construction. — Nucl. Fusion, 2017, vol. 57, № 6, p. 066047.

АО «НИИЭФА» им. Д.В. ЕФРЕМОВА, 196641 САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, пос. МЕТАЛЛОСТРОЙ, ДОРОГА НА МЕТАЛЛОСТРОЙ 3, РОССИЯ

Анатолий Борисович Минеев, в.н.с., к.ф.-м.н., лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности
min-anat@mail.ru

Эдуард Николаевич Бондарчук, начальник отдела, к. техн. н., лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности
bondar@sintez.niiefa.spb.su

Анна Александровна Воронова, инженер-конструктор 2 категории
voronova@sintez.niiefa.spb.su

Алексей Владимирович Глушаев, начальник испытательного стенда
alex.glushaev@sintez.niiefa.spb.su

Сергей Анатольевич Григорьев, в.н.с., к. техн. н.

Елена Руслановна Запретилина, начальник лаборатории, к. техн. н., ветеран атомной энергетики и промышленности
zapretilina@sintez.niiefa.spb.su

Андрей Александрович Кавин, начальник лаборатории, к.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности
kavin@sintez.niiefa.spb.su

Алексей Юрьевич Конин, инженер-исследователь II категории

Анна Михайловна Кудрявцева, математик 1 категории
kudriavtseva@sintez.niiefa.spb.su

Алексей Николаевич Лабусов, к.ф.-м.н., начальник отдела
Labusov@sintez.niiefa.spb.su

Игорь Юрьевич Родин, заместитель генерального директора по термоядерным и магнитным технологиям АО «НИИЭФА», научный руководитель приоритетного направления «сверхпроводимость» ГК «Росатом», к. техн. н., вете-ран атомной энергетики и промышленности
rodin@sintez.niiefa.spb.su

Виктор Николаевич Танчук, начальник лаборатории, ветеран атомной энергетики и промышленности
victor.tanchuk@sintez.niiefa.spb.su

Василий Андреевич Трофимов, ведущий инженер, ветеран атомной энергетики и промышленности
trofimov@sintez.niiefa.spb.su

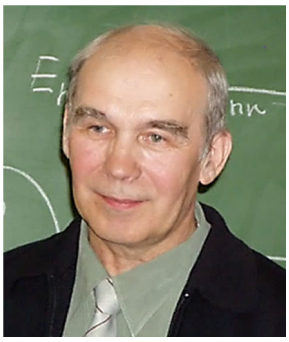
Олег Геннадьевич Филатов, научный руководитель АО «НИИЭФА», д.ф.-м.н., Золотая медаль имени И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности
filatovog@niiefa.spb.su

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.Ф. ИОФФЕ, 194021 САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, ул. ПОЛИТЕХНИЧЕСКАЯ 26, РОССИЯ

Владимир Борисович Минаев, в.н.с., к.ф.-м.н., заместитель руководителя установки, лауреат премии Правительства РФ
vladimir.minaev@mail.ioffe.ru

Николай Владимирович Сахаров, с.н.с., к.ф.-м.н., лауреат премии Правительства РФ
nikolay.sakharov@mail.ioffe.ru

Николай Николаевич Бахарев, м.н.с., к.ф.-м.н.
bakharev@mail.ioffe.ru



Василий Константинович Гусев, г.н.с, д.ф.-м.н., лауреат премии Правительства РФ
Vasily.Gusev@mail.ioffe.ru

Никита Сергеевич Жильцов, м.н.с., аспирант
nikita.zh@mail.ioffe.ru

Евгений Олегович Киселёв, аспирант

Глеб Сергеевич Курскиев, н.с., к.ф.-м.н.
gleb.kurskiev@gmail.com

Юрий Викторович Петров, с.н.с., к.ф.-м.н.
yu.petrov@mail.ioffe.ru

Анна Юрьевна Тельнова, м.н.с.
anna.telnova@gmail.com

Статья поступила в редакцию 15 января 2022 г.
После доработки 16 марта 2022 г.
Принята к публикации 25 марта 2022 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 2, с. 15—36.