

УДК 621.039.623:533.9

## ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ (GLOBSYS) ДЛЯ СЛЕДУЮЩЕГО ШАГА ПРОГРАММЫ СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА ГЛОБУС-М. ВЕРИФИКАЦИЯ РЯДА ПОДСИСТЕМ КОДА ПО ДОСТИГНУТЫМ И ПРОГНОЗИРУЕМЫМ ДАННЫМ НА УСТАНОВКАХ NSTX, NSTX-U, MAST, MAST-U и ST40

*А.Б. Минеев<sup>1</sup>, Э.Н. Бондарчук<sup>1</sup>, А.А. Кавин<sup>1</sup>, А.Ю. Конин<sup>1</sup>, И.Ю. Родин<sup>1</sup>, В.Н. Танчук<sup>1</sup>,  
В.А. Трофимов<sup>1</sup>, О.Г. Филатов<sup>1</sup>, Н.Н. Бахарев<sup>2</sup>, Н.С. Жильцов<sup>2</sup>, Г.С. Курскиев<sup>2</sup>,  
Е.О. Киселёв<sup>2</sup>, В.Б. Минаев<sup>2</sup>, Н.В. Сахаров<sup>2</sup>, Ю.В. Петров<sup>2</sup>, А.Ю. Тельнова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

В работе [1] приведены особенности кода GLOBSYS, разработанного для анализа и прогнозирования параметров и модификаций токамака Глобус-М2. Проведён предварительный отбор соотношений, связывающих физические и технические параметры. В настоящей статье проведена верификация кода на экспериментальных и прогнозируемых данных токамаков NSTX, NSTX-U, MAST, MAST-U и ST40. В целом отмечено хорошее соответствие расчётов и параметров плазмы в установках на плато разряда. Наилучшее соответствие наблюдается при использовании для времени удержания скейлинга ИТЭР с небольшим улучшением удержания  $H_{y,2} = 1-1.2$ . Расчёты для скейлингов  $\tau_E$  Globus-2021 и NSTX хорошо соответствуют параметрам плазмы установок при тороидальном поле 0,5 Тл. По мере увеличения поля расчёты по этим скейлингам приводят ко всё более оптимистичным параметрам плазмы по сравнению со скейлингом ИТЭР. Для приведённых данных токамаков NSTX, NSTX-U, MAST, MAST-U и ST40 оценено время установления профилей параметров плазмы  $\tau_{L/R}$ , которое можно назвать условием достижения квазистационарного горения плазмы. Это время сопоставлено с двумя техническими ограничениями на длительность разряда: по нагреву тороидальной обмотки в течение импульса и по запасу потока. Верификация кода GLOBSYS по данным ряда сферических токамаков служит базой для прогнозирования параметров следующего шага программы Глобус-М.

**Ключевые слова:** сферический токамак, системные коды, скейлинги, Глобус-М, верификация, NSTX, NSTX-U, MAST, MAST-U, ST40.

## ENGINEERING-PHYSICAL MODEL (GLOBSYS) FOR THE NEXT STEP OF THE GLOBUS-M SPHERICAL TOKAMAK PROGRAM. VERIFICATION OF SOME SUBSYSTEMS ON ACHIEVED AND PREDICTABLE DATA FROM INSTALLATIONS NSTX, NSTX-U, MAST, MAST-U and ST40

*A.B. Mineev<sup>1</sup>, E.N. Bondarchuk<sup>1</sup>, A.A. Kavin<sup>1</sup>, A.Yu. Konin<sup>1</sup>, I.Yu. Rodin<sup>1</sup>, V.N. Tanchuk<sup>1</sup>,  
V.A. Trofimov<sup>1</sup>, O.G. Filatov<sup>1</sup>, N.N. Bakharev<sup>2</sup>, N.S. Zhilzov<sup>2</sup>, G.S. Kurskiev<sup>2</sup>, E.O. Kiselev<sup>2</sup>,  
V.B. Minaev<sup>2</sup>, N.V. Sakharov<sup>2</sup>, Yu.V. Petrov<sup>2</sup>, A.Yu. Telnova<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>JSC «NIEFA», St. Petersburg, Russia.

<sup>2</sup>Ioffe Institute of Physics and Technology, St. Petersburg, Russia.

GLOBSYS code was developed for analysis and prediction of parameters Globus-M2 tokamak and its modifications. In [1] preliminary selection of correlations, which connect physical and technical parameters were made. In given paper verification of the code on achieved and predictable data from installations NSTX, NSTX-U, MAST, MAST-U and ST40 is given. As a whole there is good accordance between simulations and plasma parameters at the discharge plateau. The best accordance is observed if ITER confinement scaling is used for energy confinement time with enhancement factor  $H_{y,2} = 1-1.2$ . Simulations with another confinement scaling's (Globus-2021, NSTX scaling's) give good accordance with plasma parameters at the level of toroidal field  $B_{t0} \sim 0.5$  T. As far as  $B_{t0}$  increasing, more optimistical prediction of plasma parameters is marked for Globus-2021, NSTX scaling's in comparison with ITER confinement scaling. Condition of plasma quasistationary regime reaching (or interval of quasistationary plasma profiles establishment  $\tau_{L/R}$ ) is estimated for NSTX, NSTX-U, MAST, MAST-U and ST40 discharges. This time is compared with two technical limits, which are connected with intervals of toroidal field coil heating and poloidal flux capacity. Verification of GLOBSYS code on the data from indicated spherical tokamaks is the base for the prediction next step of Globus-M program parameters.

**Key words:** spherical tokamak, system codes, scaling, Globus-M, verification, NSTX, NSTX-U, MAST, MAST-U, ST40.

DOI: 10.21517/0202-3822-2021-44-4-43-53

### ВВЕДЕНИЕ

В статье [1] приведены описание инженерно-физической модели GLOBSYS и сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными разряда № 38 800 сферического токамака

Глобус-М2. Хорошее соответствие с параметрами Глобус-М2 позволяет расширить область верификации модели на данные с других современных сферических токамаков. Решению этой задачи посвящена настоящая работа, являющаяся продолжением [1].

В качестве базы для верификации выбрана табл. 2 из работы [2], где приведены достигнутые и прогнозные параметры плазмы в сферических токамаках NSTX, NSTX-U, MAST, MAST-U и ST40. Эти данные сопоставлены с расчётами по коду GLOBSYS.

### NSTX

Для сопоставления использованы параметры плазмы, достигнутые в экспериментах на NSTX и приведённые в работе [2] (табл. 2, столбец NSTX achieved, NSTX-A-HSE (High Stored Energy)). Часть недостающих данных взята из [3].

Результаты сопоставления приведены в табл. 1 (столбцы расчётных данных табл. 1 соответствуют различным принимаемым скейлингам энергетического времени жизни плазмы: скейлингу ИТЭР с коэффициентом улучшения удержания  $H_{y,2} = 1,2$  (как и в [2]), скейлингу Globus-2021 [4] и скейлингу NSTX [5]). При указанных в верхней части таблицы исходных данных расчёты по коду равновесия DIALEQT приводят к значению запаса устойчивости  $q(0) \approx 1$ . Профильные коэффициенты для концентрации и температуры плазмы близки к приведённым в работе [3]:  $\alpha_n \sim 1$ ,  $\alpha_T \sim 1,5$ .

Для доли бутстреп-тока использован скейлинг Wesson'a [1] в виде  $f_{BS,W} = C_{BS} \epsilon^{1/2} \beta_P$ ,  $C_{BS} = 0,45$ . Для разряда № 38 800 Глобус-М2 он даёт результат, близкий к измеренному [1].

Поглощённая в плазме мощность пучкового нагрева  $P_{NB,abs}$  определялась по методике, приведённой в работе [6] (по соотношению между временем торможения быстрых частиц и энергетическим временем жизни плазмы). При подводимой к плазме мощности  $P_{NB,in} = 6,3$  МВт она оценена  $P_{NB,abs} \sim 5,2$  МВт.

Концентрация плазмы  $\langle n_e \rangle_V$  выбиралась на уровне 0,7 от предела Гринвальда. Расчётные значения индуктивности и сопротивление для указанного варианта составили  $L_{pl} \approx 0,41$  мкГн и  $R_{pl} \approx 0,35$  мкОм. В результате постоянная времени установления профилей параметров плазмы  $\tau_{L/R} \sim 1,1$  с.

Т а б л и ц а 1. Вариант NSTX-A-HSE из [2]: сопоставление с расчётами

Параметр	Данные [2], NSTX-A-HSE	Код GLOBSYS, $\tau_E, ITER, H_{y,2} = 1,2$	Код GLOBSYS, $\tau_E, Globus-2021$ [4]	Код GLOBSYS, $\tau_E, NSTX$ [2]
$R$ , м	0,89	0,89	0,89	0,89
$a$ , м	0,61	0,61	0,61	0,61
$k/\delta$	2,5/0,6	2,5/0,6	2,5/0,6	2,5/0,6
$I_{pl}$ , МА	1,33	1,33	1,33	1,33
$B_{t0}$ , Тл	0,48	0,48	0,48	0,48
$l_i$	0,45	0,45	0,45	0,45
$P_{NB,in}$ , МВт	6,3	6,3	6,3	6,3
$E_{NB}$ , кэВ	80	80	80	80
$W_{pl}$ , МДж	0,43	0,46	0,42	0,30
$W_{fast}/W_{tot}$	0,15	0,12	0,12	0,12
$q_{95}/q(0)/q^*$	—/—/2,77	10,2/1/2,77	10,2/1/2,77	10,2/1/2,77
$\tau_E$ , мс	—	85	76	54
$\beta_{pl}$	—	1,1	1,0	0,76
$\beta_N$	5,5	5,8 (th)/6,5 (tot)*	5,3 (th)/6,0 (tot)*	3,8 (th)/4,3 (tot)*
$\beta_t$ , %	25	26 (th)/30 (tot)*	24 (th)/27 (tot)*	17 (th)/19 (tot)*
$f_{BS}$ , %	35	43	39	28
$f_{CD}$ , %	15	15	14	10
$\langle T \rangle_n$ , кэВ	0,84	0,95	0,87	0,62
$\langle n_e \rangle_V$ , $10^{20} \text{ м}^{-3}$	0,79	0,8	0,8	0,8
$P_{OH}$ , МВт	0	0,25	0,3	0,6
$U_{res}$ , В	—	0,2	0,25	0,43

\*th — тепловая составляющая, tot — полная, с учётом быстрого компонента.

Как следует из табл. 1, расчёты параметров плазмы по коду GLOBSYS близки к данным NSTX-A-HSE [2]. Наилучшее соответствие наблюдается при использовании скейлинга  $\tau_E, Globus-2021$  [5], полученного в результате обработки экспериментов на токамаках Глобус-М, Глобус-М2, MAST и NSTX. В то же

время скейлинг NSTX [6] приводит к более низким параметрам плазмы: для параметров разряда NSTX-A-HSE [2] значение энергетического времени жизни плазмы  $\tau_{E, \text{NSTX}} \approx 54$  мс существенно меньше, чем 85 мс по скейлингу ИТЭР (с  $H_{y,2} = 1,2$ ) и 76 мс по скейлингу  $\tau_{E, \text{Globus-2021}}$ .

Данные, приведённые в [2, 3], позволяют провести сопоставление времени  $\tau_{L/R}$  установления профилей с допустимой длительностью плато тороидального поля, а также определить компоненты баланса потока.

Для параметров разряда NSTX-A-HSE [2] конструктивная плотность тока в центральном ядре тороидальной обмотки NSTX по данным геометрии обмотки [6] составляет около  $70 \text{ MA/m}^2$ . При коэффициенте заполнения обмотки проводником  $\sim 0,7$  плотность тока по проводнику  $\sim 100 \text{ MA/m}^2$ . Плато тороидального поля сохраняется в течение всего импульса разряда и складывается из времени подъёма тока плазмы и длительности плато тока. Согласно [3] время подъёма тока плазмы до  $1,3 \text{ MA}$  составляет  $\sim 0,3$  с. При длительности плато, близкой к  $\tau_{L/R} \sim 1,1$  с, это даёт суммарное требуемое время плато тороидального поля  $\sim 1,4$  с. За это время перегрев тёплой медной обмотки может составить  $\sim 70$  °C, что близко к техническому пределу. Действительно, в [3] указано, что максимальная длительность плато тороидального поля для разряда, близкого к NSTX-A-HSE, составляет  $1,17$  с.

Проектное значение запаса потока в центральном соленоиде NSTX  $\Delta\psi_{\text{max}} = 0,75$  Вб [6]. В разряде NSTX-A-HSE запас потока несколько меньше — около  $0,6$  Вб [3]. Из параметров, приведённых в табл. 1, следует, что вклад в поток от наружных полоидальных обмоток может составить ещё  $0,6$  Вб (при вертикальном равновесном магнитном поле  $B_{\text{eq}} \sim 0,25$  Тл и оценке вклада в поток от полоидальных обмоток  $\sim \pi R^2 B_{\text{eq}}$ ). Таким образом, полный запас потока в разряде  $\sim 1,2$  Вб. Оценим вклад главных составляющих затрат потока: резистивные на подъёме тока плазмы; индуктивные и резистивные затраты на плато тока при нагреве.

Согласно [3] (табл. 1 из [3], данные для варианта NSTX с током плазмы  $1,3 \text{ MA}$ ) резистивные затраты потока на стадии подъёма тока плазмы  $\Delta\psi_{\text{ramp-up}} \approx 0,48$  Вб. В этом случае коэффициент Эйджины довольно мал,  $S_{\text{Ejima}} \approx 0,33$ . Следует отметить, что на NSTX проводилась специальная серия экспериментов [8] по минимизации  $\Delta\psi_{\text{ramp-up}}$  и достигнуты значения  $S_{\text{Ejima}} \approx 0,3$ — $0,4$ .

Индуктивная составляющая потока  $L_{\text{pl}} I_{\text{pl}}$  для разряда NSTX-A-HSE  $\Delta\psi_{\text{ind}} \approx 0,55$  Вб. Резистивные затраты потока на плато длительностью  $\Delta t_{\text{plateau}} = 1$  с при нагреве (см. значение резистивного напряжения в табл. 1) могут составить  $0,25$  Вб. Если учесть затраты потока на стадии создания условий для пробоя, на начальную стадию разряда и на переходные процессы при нагреве (отметим, что в токамаке Глобус-М2 эти дополнительные затраты потока составили  $\sim 13\%$  от полных, см. [1, данные табл. 5]), то суммарные затраты потока превысят имеющийся запас. Это означает, что длительность плато тока должна быть меньше  $1$  с. Действительно, согласно работе [3] (табл. 1 из [3], данные NSTX для тока плазмы  $1,3 \text{ MA}$ ) длительность плато тока существенно меньше,  $\Delta t_{\text{plateau}} = 0,39$  с.

## NSTX-U

По сравнению с параметрами NSTX в NSTX-U увеличены тороидальное поле  $B_{t0}$  с  $0,5$  до  $1$  Тл, запас потока  $\Delta\psi_{\text{max}}$  с  $0,75$  до  $2,1$  Вб, ток плазмы  $I_{\text{pl}}$  с  $1$ — $1,3$  до  $2 \text{ MA}$ , длительность разряда  $\Delta t$  с  $1$ — $1,5$  до  $5$ — $8$  с, мощность нагрева  $P_{\text{AUX}}$  с  $\sim 6$  до  $\sim 15$ — $20 \text{ MW}$ .

Существенный рост поля и потока привёл к необходимости радикального изменения размеров центрального ядра. Так, на внутреннем обводе радиус тороидальной ноги  $R_{\text{tfc}}$  увеличен вдвое — с  $10$  до  $20$  см. Поскольку ток по тороидальной обмотке  $I_{\text{rod}}$  увеличен вдвое ( $\sim B_{t0}$ ), а площадь внутренней ноги вчетверо ( $\sim R_{\text{tfc}}^2$ ), это позволяет существенно увеличить длительность разряда. Поскольку омический соленоид намотан на центральный ядро, то запас потока в нём растёт пропорционально  $R_{\text{tfc}}^2$ . Но при этом аспектное отношение  $A$  должно быть увеличено с  $1,3$ — $1,5$  до  $\sim 1,7$ , поскольку внешняя часть вакуумной камеры при переходе от NSTX к NSTX-U осталась неизменной.

Для сопоставления выбран вариант, приведённый в обзоре [2] (табл. 2, столбец NSTX-U-goal (High Stored Energy, High Power)  $\equiv$  NSTXU-G-HSE-HP). Отметим, что эти данные NSTX-U являются расчётными, полученными с помощью 1.5D-транспортного кода TRANSP и собственного 0D-кода команды NSTX.

Т а б л и ц а 2. Вариант NSTXU-G-HSE-HP из [2]: сопоставление с расчётами

Параметр	Данные [2], NSTXU-G-HSE-HP	Код GLOBSYS, $\tau_E, \text{ITER}, H_{y,2} = 1,16$	Код GLOBSYS, $\tau_E, \text{Globus-2021}$ [4]	Код GLOBSYS, $\tau_E, \text{NSTX}$ [2]
$R$ , м	0,94	0,94	0,94	0,94
$a$ , м	0,55	0,55	0,55	0,55
$k/\delta$	2,75/0,5	2,75/0,5	2,75/0,5	2,75/0,5
$I_{pl}$ , МА	2	2	2	2
$B_{t0}$ , Тл	1	1	1	1
$l_i$	0,5	0,5	0,5	0,5
$P_{NB, in}$ , МВт	15,6	15,6	15,6	15,6
$E_{NB}$ , кэВ	100	100	100	100
$W_{pl}$ , МДж	1,4	1,4	3,0	1,55
$W_{fast}/W_{tot}$	0,1	0,1	0,11	0,12
$q_{95}/q(0)/q^*$	—/—/3,48	8,4/1/3,5	8,4/1/3,5	8,4/1/3,5
$\tau_E$ , мс	—	100	210	110
$\beta_{pl}$	—	1,5	3,3	1,65
$\beta_N$	5,5	5,0 (th)/5,6 (tot)*	11 (th)/12 (tot)*	5,5 (th)/6,2 (tot)*
$\beta_t$ , %	20	18 (th)/20 (tot)*	40 (th)/44 (tot)*	20 (th)/22 (tot)*
$f_{BS}$ , %	48	51	100	57
$f_{CD}$ , %	18	18	35	20
$\langle T \rangle_n$ , кэВ	—	1,6	3,4	1,7
$\langle n_e \rangle_V, 10^{20} \text{ м}^{-3}$	1,47	1,47	1,47	1,47
$P_{OH}$ , МВт	0	0,24	0	0,16
$U_{res}$ , В	—	0,12	0	0,08

\*th — тепловая составляющая; tot — полная, с учётом быстрого компонента.

Результаты сопоставления приведены в табл. 2 (столбцы расчётных данных табл. 2 соответствуют различным принимаемым скейлингам энергетического времени жизни плазмы: скейлингу ИТЭР с коэффициентом улучшения удержания  $H_{y,2} = 1,16$  (как и в [2]), скейлингу Globus-2021 [4] и скейлингу NSTX [2]). При указанных в верхней части таблицы исходных данных расчёты по коду равновесия DIALEQT приводят к значению запаса устойчивости  $q(0) \approx 1$ . Профильные коэффициенты для концентрации и температуры плазмы близки к приведённым в работе [3]:  $\alpha_n \sim 1,3$ ,  $\alpha_T \sim 1,5$ .

Концентрация плазмы  $\langle n_e \rangle_V$  выбиралась на уровне 0,7 от предела Гринвальда. Поглощённая в плазме мощность пучкового нагрева  $P_{NB, abs}$  определялась по методике работы [6], при подводимой к плазме мощности  $P_{NB, in} = 15,6$  МВт она оценена  $P_{NB, abs} \sim 13,5$  МВт.

Расчётные значения индуктивности и сопротивления для указанного варианта составили  $L_{pl} \approx 0,55$  мкГн и  $R_{pl} \approx 0,2$  мкОм. В этом случае постоянная времени установления профилей параметров плазмы  $\tau_{L/R} \sim 3$  с.

Из данных табл. 2 следует, что расчёты по коду GLOBSYS со скейлингами ИТЭР (при  $H_{y,2} = 1,16$ ) и NSTX приводят к примерно одинаковым результатам, очень близким к исходным данным NSTXU-G-HSE-HP, и дают значение  $\tau_E \sim 110$  мс. Однако при использовании скейлинга Globus-2021 значение энергетического времени жизни вдвое больше (по сравнению со скейлингами ИТЭР и NSTX), что позволяет прогнозировать весьма оптимистичные значения энергии плазмы, параметр  $\beta$  и доли неиндуктивного тока. Такое сильное отличие результатов связано с формой зависимости скейлингов от размеров ( $R_0$ ,  $\epsilon$ ) и мощности нагрева  $P$ . Действительно, из результатов сопоставления скейлингов NSTX и Globus-2021  $\tau_{E, NSTX} \sim I_{pl}^{0,57} B_t^{1,08} R_0^{1,97} \epsilon^{0,58} / P^{0,73}$  и  $\tau_{E, Globus-2021} \sim I_{pl}^{0,53} B_t^{1,05} R_0^{2,62} I_{pl}^{0,5} / P^{0,58}$  следует, что при использовании скейлинга  $\tau_{E, Globus-2021}$  более сильная зависимость от большого радиуса и более слабая — от мощности нагрева фактически полностью объясняет результирующее отличие значений времени удержания, указанных в табл. 2.

Сопоставим время установления профилей плазмы  $\tau_{L/R}$  с допустимой длительностью плато тороидального поля.

Для параметров разряда NSTXU-G-HSE-HP [2] конструктивная плотность тока в центральном керне тороидальной обмотки NSTX-U по данным геометрии обмотки [6] составляет около 37 МА/м<sup>2</sup>. При ко-

эффиценте заполнения обмотки проводником  $\sim 0,7$  плотность тока по проводнику  $\sim 50$  МА/м<sup>2</sup>. Плато тороидального поля сохраняется в течение всего импульса разряда и складывается из времени подъёма тока плазмы и длительности плато тока. Для времени подъёма тока плазмы до 2 МА примем оценку  $\sim 0,5$  с. При длительности плато, близкой к  $\tau_{L/R} \sim 3$  с, это даёт суммарное требуемое время плато тороидального поля  $\sim 3,5$  с. За это время перегрев тёплой медной обмотки может составить  $\sim 35$ — $40$  °С. Это означает, что длительность плато тока плазмы при указанных параметрах NSTX-U можно увеличить до 5—6 с. Такая величина близка к проектной в NSTX-U.

Проектное значение запаса потока в центральном соленоиде NSTX  $\Delta\Psi_{\max} = 2,1$  Вб [6]. Из параметров, приведённых в табл. 2, следует, что вклад в поток от наружных полоидальных обмоток может составить ещё 1,3 Вб (при вертикальном равновесном магнитном поле  $B_{\text{eq}} \sim 0,5$  Тл). Таким образом, полный запас потока в данном сценарии  $\sim 3,4$  Вб. Из затрат потока учтём три главных составляющих: резистивные на подъёме тока плазмы, индуктивные и резистивные затраты на плато тока при нагреве.

При оценке резистивных затрат потока на стадии подъёма тока плазмы  $\Delta\Psi_{\text{ramp-up}}$  примем значение коэффициента Эйджины  $S_{\text{Ejima}} \approx 0,33$ . Это приводит к  $\Delta\Psi_{\text{ramp-up}} \approx 0,8$  Вб. Индуктивная составляющая потока  $L_{\text{pl}}I_{\text{pl}}$  для разряда NSTX-A-HSE  $\Delta\Psi_{\text{ind}} \approx 1,1$  Вб. Резистивные затраты потока на плато длительностью  $\Delta t_{\text{plateau}} = 5$ — $6$  с при нагреве (см. значение резистивного напряжения в табл. 2) могут составить 0,5—0,6 Вб. Если принять, что затраты потока на стадии создания условий для пробоя, на начальную стадию разряда и на переходные процессы при нагреве составляют  $\sim 10\%$  от полных, то суммарные затраты потока примерно сравняются с запасом потока. Таким образом, длительность плато  $\sim 5$  с выглядит разумной. Это значение уже несколько превышает постоянную времени установления профилей параметров плазмы  $\tau_{L/R} \sim 3$  с.

## MAST

Для сопоставления использованы параметры плазмы, достигнутые в экспериментах на MAST и приведённые в работе [2] (табл. 2, столбец MAST achieved, MAST-A-HSE (High Stored Energy)).

Результаты сопоставления приведены в табл. 3 (столбцы расчётных данных табл. 3 соответствуют различным принимаемым скейлингам энергетического времени жизни плазмы: скейлингу ИТЭР с коэффициентом улучшения удержания  $H_{y,2} = 1,0$  (как и в [2]), скейлингу Globus-2021 [4] и скейлингу NSTX [5]. При указанных в верхней части таблицы исходных данных расчёты по коду равновесия DIALEQT приводят к значению запаса устойчивости на периферии  $q_{95} \approx 15$  и в центре  $q(0) \approx 2$ . Значения профильных коэффициентов для концентрации и температуры плазмы при таком значении  $q_{95}$  выбраны соответственно  $\alpha_n \sim 1,5$ ,  $\alpha_T \sim 2$ .

Поглощённая в плазме мощность пучкового нагрева  $P_{\text{NB,abs}}$  определялась по методике, приведённой в работе [6] (по соотношению между временем торможения быстрых частиц и энергетическим временем жизни плазмы). При подводимой к плазме мощности  $P_{\text{NB,in}} = 3$  МВт поглощённая мощность оценена  $P_{\text{NB,abs}} \sim 2,4$  МВт.

Концентрация плазмы  $\langle n_e \rangle_V$  выбиралась на уровне 0,4 от предела Гринвальда. Расчётные значения индуктивности и сопротивление для указанного варианта составили  $L_{\text{pl}} \approx 0,5$  мкГн и  $R_{\text{pl}} \approx 0,5$  мкОм, откуда постоянная времени установления профилей параметров плазмы  $\tau_{L/R} \sim 1$  с.

Исходные данные оказались немного выше расчётных данных для всех использованных скейлингов. Особенно существенно различие в доле энергии быстрых частиц (в исходных данных MAST-A-HSE в [2] приведено значение  $W_{\text{fast}}/W_{\text{tot}} = 0,4$ , в расчётах для всех скейлингов  $W_{\text{fast}}/W_{\text{tot}} \approx 0,2$ ). Данные по всем скейлингам оказались близки.

Отметим, что в расчётах по коду GLOBSYS доля поглощённой мощности пучка оказалась около 0,8 (из вводимых 3 МВт поглощается 2,4 МВт). Однако при учёте расчётной мощности омического нагрева  $\sim 0,5$ — $0,6$  МВт (в исходных данных варианта MAST-A-HSE мощность омического нагрева полагалась  $P_{\text{OH}} = 0$ ) суммарный нагрев оказался близким к величине 3 МВт, той же, что и в исходных данных.

Оценим уровень нагрева обмотки тороидального поля в узкой её части и допустимую длительность разряда. Согласно работе [9] суммарное сечение проводника в узкой части центрального ядра ОТП то-

камака MAST составляет 300 см<sup>2</sup>. При значении поля, указанном в табл. 3, суммарный ток по ОТП 2,2 МА, или 92 кА по каждому из 24 витков. Это означает, что плотность тока по проводнику около 75 МА/м<sup>2</sup>. При такой плотности тока и допустимом перегреве проводника ~70 °С возможна реализация плато тороидального поля около 2 с. Этот промежуток превышает время установления профилей параметров плазмы ( $\tau_{LR} \sim 1$  с) даже с учётом времени формирования разряда и подъёма тока плазмы.

Т а б л и ц а 3. **Вариант MAST-A-HSE из [2]: сопоставление с расчётами**

Параметр	Данные [2], MAST-A-HSE	Код GLOBSYS, $\tau_E, ITER, H_{y,2} = 1,0$	Код GLOBSYS, $\tau_E, Globus-2021$ [4]	Код GLOBSYS, $\tau_E, NSTX$ [2]
$R$ , м	0,85	0,85	0,85	0,85
$a$ , м	0,65	0,65	0,65	0,65
$k/\delta$	2,1/0,5	2,1/0,5	2,1/0,5	2,1/0,5
$I_{pl}$ , МА	1,2	1,2	1,2	1,2
$B_{t0}$ , Тл	0,52	0,52	0,52	0,52
$l_i$	0,7	0,7	0,7	0,7
$P_{NB, in}$ , МВт	3	3	3	3
$E_{NB}$ , кэВ	65	65	65	65
$W_{pl}$ , МДж	0,22	0,18	0,16	0,16
$W_{fast}/W_{tot}$	0,4	0,2	0,19	0,19
$q_{95}/q(0)/q^*$	—/—/2,95	15/2/2,9	15/2/2,9	15/2/2,9
$\tau_E$ , мс	—	64	53	53
$\beta_{pl}$	—	0,5	0,43	0,43
$\beta_N$	3,3	2,6 (th)/3,2 (tot)*	2,3 (th)/2,8 (tot)*	2,3 (th)/2,8 (tot)*
$\beta_t$ , %	11,5	9 (th)/11 (tot)*	8 (th)/10 (tot)*	8 (th)/10 (tot)*
$f_{BS}$ , %	20	20	17	17
$f_{CD}$ , %	15	15	13	13
$\langle T \rangle_n$ , кэВ	0,81	0,88	0,76	0,76
$\langle n_e \rangle_V$ , $10^{20}$ м <sup>-3</sup>	0,36	0,36	0,36	0,36
$P_{OH}$ , МВт	0	0,44	0,6	0,6
$U_{res}$ , В	—	0,4	0,5	0,5

\*th — тепловая составляющая, tot — полная, с учётом быстрого компонента.

Проектное значение запаса потока в центральном соленоиде MAST  $\Delta\Psi_{max} = 0,9$  Вб [6]. Из параметров, приведённых в табл. 3, следует, что вклад в поток от наружных полоидальных обмоток может составить ещё 0,45 Вб (при вертикальном равновесном магнитном поле  $B_{eq} \sim 0,2$  Тл). Таким образом, полный запас потока в разряде может достичь ~1,35 Вб. Из затрат потока учтём три главных составляющих: резистивные затраты на подъёме тока плазмы, индуктивные и резистивные затраты на плато тока при нагреве.

При значении коэффициента Эйджимы  $C_{Ejima} \approx 0,4—0,5$  величина  $\Delta\Psi_{ramp-up} \sim 0,5—0,65$  Вб. Индуктивная составляющая потока  $L_{pl}I_{pl}$  для разряда MAST-A-HSE  $\Delta\Psi_{ind} \approx 0,6$  Вб. Резистивные затраты потока на плато длительностью  $\Delta t_{plateau} = \tau_{LR} \approx 1$  с при нагреве (см. значение резистивного напряжения  $U_{res} \sim 0,4—0,5$  В в табл. 3) могут составить 0,5 Вб. В данном случае получается, что даже без учёта затрат потока на стадии создания условий для пробоя и на начальной стадии разряда суммарные затраты потока превысят имеющийся запас. Это означает, что длительность плато тока должна быть меньше 1 с, ближе к 0,3—0,4 с. Таким образом, именно запас потока при базовых параметрах установки ограничивает в MAST длительность разряда.

### MAST-U

По сравнению с параметрами MAST в MAST-U увеличены согласно [9] тороидальное поле  $B_{t0}$  с 0,52 до 0,78 Тл, запас потока  $\Delta\Psi_{max}$  с 0,9 до 1,7 Вб, ток плазмы  $I_{pl}$  с 1—1,2 до 2 МА, длительность разряда  $\Delta t$  с 0,5 до 5 с (при тороидальном поле 0,54 Тл), мощность нагрева  $P_{AUX}$  с 3 до ~7,5—10 МВт.

Как и в случае с NSTX-U, увеличение тороидального поля и запаса потока потребовало существенно изменить конструкцию центрального ядра.

Согласно работе [9] в MAST-U суммарное сечение проводника в узкой части центрального ядра ОТП составляет 480 см<sup>2</sup> (увеличение по сравнению с MAST в 1,5 раза). При значении тороидального поля  $B_{t0} = 0,78$  Тл (на радиусе 0,82 м) суммарный ток по ОТП 3,2 МА, или 133 кА по каждому из 24 витков. В результате плотность тока по проводнику около 66 МА/м<sup>2</sup>. При такой плотности тока и допусти-

мом перегреве проводника  $\sim 70$  °С возможна реализация плато тороидального поля только около 2,5 с. Поэтому в MAST-U для дальнейшего увеличения длительности импульса рассматривается возможность [10] предварительного захлаживания обмотки до  $-20$  °С и расширения допустимого диапазона работы обмотки при температуре от  $-20$  до  $100$  °С.

Для сопоставления использованы прогнозные параметры плазмы в MAST-U, приведённые в работе [2] (табл. 2, столбец MAST-U goal, MASTU-G-HSE (High Stored Energy)).

Результаты сопоставления приведены в табл. 4 (столбцы расчётных данных табл. 4 соответствуют различным принимаемым скейлингам энергетического времени жизни плазмы: скейлингу ИТЭР с коэффициентом улучшения удержания  $H_{y,2} = 1,0$  (как и в [2]), скейлингу Globus-2021 [4] и скейлингу NSTX [5]. При указанных в верхней части таблицы исходных данных расчёты по коду равновесия DIALEQT приводят к значению запаса устойчивости на периферии  $q_{95} \approx 6,7$  и в центре  $q(0) \approx 1$ . Значения профильных коэффициентов для концентрации и температуры плазмы при таком значении  $q_{95}$  выбраны соответственно  $\alpha_n \sim 1,0$ ,  $\alpha_T \sim 1,5$ .

Т а б л и ц а 4. Вариант MASTU-G-HSE из [2]: сопоставление с расчётами

Параметр	Данные [2], MASTU-G-HSE	Код GLOBSYS, $\tau_E, \text{ITER}, H_{y,2} = 1,0$	Код GLOBSYS, $\tau_E, \text{Globus-2021 [4]}$	Код GLOBSYS, $\tau_E, \text{NSTX [2]}$
$R$ , м	0,82	0,82	0,82	0,82
$a$ , м	0,53	0,53	0,53	0,53
$k/\delta$	2,5/0,5	2,5/0,5	2,5/0,5	2,5/0,5
$I_{pl}$ , МА	2	2	2	2
$B_{i0}$ , Тл	0,78	0,78	0,78	0,78
$l_i$	0,7	0,7	0,7	0,7
$P_{NB, in}$ , МВт	7,5	7,5	7,5	7,5
$E_{NB}$ , кэВ	75	75	75	75
$W_{pl}$ , МДж	0,56	0,42(th)/0,54(tot)*	0,52(th)/0,65(tot)*	0,43(th)/0,55(tot)*
$W_{fast}/W_{tot}$	0,3	0,28	0,26	0,27
$q_{95}/q(0)/q^*$	—/—/2,38	6,7/1/2,7	6,7/1/2,7	6,7/1/2,7
$\tau_E$ , мс	—	72	92	74
$\beta_{pl}$	—	0,5	0,6	0,5
$\beta_N$	3,7	2,6 (th)/3,6 (tot)*	3,3 (th)/4,4 (tot)*	2,6 (th)/3,7 (tot)*
$\beta_t$ , %	18	13 (th)/18 (tot)*	16 (th)/22 (tot)*	13 (th)/18 (tot)*
$f_{BS}$ , %	47	18	22	18
$f_{CD}$ , %	—	32	40	32
$\langle T \rangle_n$ , кэВ	2,1	2,0	2,4	2,0
$\langle n_e \rangle_V$ , $10^{20} \text{ м}^{-3}$	0,5	0,5	0,5	0,5
$P_{OH}$ , МВт	0	0,5	0,2	0,34
$U_{res}$ , В	—	0,2	0,15	0,17

\*th — тепловая составляющая, tot — полная, с учётом быстрого компонента.

Поглощённая в плазме мощность пучкового нагрева  $P_{NB, abs}$  определялась по методике, приведённой в работе [6] (по соотношению между временем торможения быстрых частиц и энергетическим временем жизни плазмы). При подводимой к плазме мощности  $P_{NB, in} = 7,5$  МВт поглощённая мощность оценена  $P_{NB, abs} \sim 5,5$  МВт.

Принято значение концентрации плазмы  $\langle n_e \rangle_V = 0,5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ , на уровне 0,24 от предела Гринвальда.

Расчётные значения индуктивности и сопротивление для указанного варианта составили  $L_{pl} \approx 0,55$  мкГн и  $R_{pl} \approx 0,18$  мкОм, откуда постоянная времени установления профилей параметров плазмы  $\tau_{L/R} \sim 3$  с.

Все использованные скейлинги приводят к примерно одинаковым результатам, согласующимся с исходными данными [2]. Скейлинг Globus-2021 даёт немного (на 15—20%) завышенные результаты.

Проектное значение запаса потока в центральном соленоиде MAST  $\Delta\psi_{max} = 1,7$  Вб [6]. Из параметров, приведённых в табл. 4, следует, что вклад в поток от наружных полоидальных обмоток может составить ещё 0,7 Вб (при вертикальном равновесном магнитном поле  $B_{eq} \sim 0,34$  Тл). Таким образом, полный запас потока в разряде может достичь  $\sim 2,4$  Вб. Из затрат потока учтём три главных составляющих: резистивные на подъёме тока плазмы, индуктивные и резистивные затраты на плато тока при нагреве.

При значении коэффициента Эйджимы  $C_{Ejima} \approx 0,4—0,5$  величина  $\Delta\psi_{ramp-up} \sim 0,8—1$  Вб. Индуктивная составляющая потока  $L_{pl}I_{pl}$  для разряда MAST-A-HSE  $\Delta\psi_{ind} \approx 1,1$  Вб. Резистивные затраты потока на плато длительностью  $\Delta t_{plateau} = \tau_{L/R} \approx 3$  с при нагреве (см. значение резистивного напряжения  $U_{res} \sim 0,2$  В

в табл. 4) могут составить 0,6 Вб. В данном случае получается, что даже без учёта затрат потока на стадии создания условий для пробоя и на начальной стадии разряда суммарные затраты потока превысят имеющийся запас. Это означает, что длительность плато может быть несколько меньше — около 2 с. Таким образом, в MAST-U как запас потока при базовых параметрах установки, так и нагрев тороидальной обмотки ограничивают длительность разряда.

### ST40

В ST40 предполагается работа при рекордном для сферических токамаков значении тороидального поля  $B_{t0} = 3$  Тл (на радиусе  $R = 40$  см) (!). В работе [2] приведены прогнозные параметры плазмы (табл. 2, столбец ST40 goal (Programs 1—3), ST40-G-P13). Некоторые недостающие данные взяты из работы [11], в которой приведены детали расчёта параметров по коду ASTRA.

Результаты сопоставления приведены в табл. 5 (столбцы расчётных данных табл. 5 соответствуют различным принимаемым скейлингам энергетического времени жизни плазмы: скейлингу ИТЭР с коэффициентом улучшения удержания  $H_{y,2} = 1,0$  (как и в [2]), скейлингу Globus-2021 [4] и скейлингу NSTX [5]). При указанных в верхней части таблицы исходных данных расчёты по коду равновесия DIALEQT приводят к значению запаса устойчивости на периферии  $q_{95} \approx 9$  и в центре  $q(0) \approx 1,5$ . Значения профильных коэффициентов для концентрации и температуры плазмы  $\alpha_n \sim 0,5$ ,  $\alpha_T \sim 1,5$ . Эффективный заряд плазмы принимался равным единице —  $Z_{эф} = 1$ , как и в [11].

Т а б л и ц а 5. Вариант ST40-G-P13 из [2]: сопоставление с расчётами

Параметр	Данные [2], ST40-G-FP	Код GLOBSYS, $\tau_E, \text{ITER}, H_{y,2} = 1,4$	Код GLOBSYS, $\tau_E, \text{Globus-2021}$ [4]	Код GLOBSYS, $\tau_E, \text{NSTX}$ [2]
$R$ , м	0,40	0,40	0,40	0,40
$a$ , м	0,24	0,24	0,24	0,24
$k/\delta$	2,5/0,35	2,5/0,35	2,5/0,35	2,5/0,35
$I_{pl}$ , МА	2	2	2	2
$B_{t0}$ , Тл	3	3	3	3
$l_i$	0,7	0,7	0,7	0,7
$P_{NB, in}$ , МВт	4	4	4	4
$E_{NB}$ , кэВ	50	50	50	50
$W_{pl}$ , МДж	0,2	0,28	0,7	0,73
$W_{fast}/W_{tot}$	0,05	0,04	0,02	0,02
$q_{95}/q(0)/q^*$	—/—/3,76	9/1/3,72	9/1/3,72	9/1/3,72
$\tau_E$ , мс	—	110	360	380
$\beta_{pl}$	—	0,57	1,4	1,48
$\beta_N$	1,6	1,7 (th)/1,8 (tot)*	4,3 (th)/4,4 (tot)*	4,5 (th)/4,6 (tot)*
$\beta_t$ , %	4,5	4,8 (th)/4,9 (tot)*	12 (th)/12 (tot)*	12 (th)/13 (tot)*
$f_{BS}$ , %	35	20	50	52
$f_{CD}$ , %	—	3	7	7
$\langle T \rangle_n$ , кэВ	1,66	1,68	4	4,4
$\langle n_e \rangle_V, 10^{20} \text{ м}^{-3}$	3,14	3,2	3,2	3,2
$P_{OH}$ , МВт	—	0,7	0,12	0,1
$U_{res}$ , В	—	0,35	0,06	0,06

\*th — тепловая составляющая, tot — полная, с учётом быстрого компонента.

Концентрация плазмы  $\langle n_e \rangle_V$  принималась  $\sim 3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ , на уровне 0,24 от предела Гринвальда. При такой большой концентрации поглощённая в плазме мощность пучкового нагрева близка к подводимой,  $P_{NB, abs} \approx P_{NB, in} \approx 2$  МВт.

Расчётные значения индуктивности и сопротивление для указанного варианта составили  $L_{pl} \approx 0,29$  мкГн и  $R_{pl} \approx 0,22$  мкОм. В этом случае постоянная времени установления профилей параметров плазмы  $\tau_{LR} \sim 1,3$  с.

Как следует из данных таблицы, приемлемое соответствие исходных данных [2] и расчётов имеет место только при использовании скейлинга ИТЭР с  $H_{y,2} = 1,4$ . Два других скейлинга (Globus-2021 и NSTX) приводят к более оптимистическим параметрам, в несколько раз превышающим ожидаемые. При этом происходит своеобразная развилка: либо уровень экстраполяции скейлингов Globus-2021 и NSTX по величине тороидального поля (с 0,5 до 3 Тл) слишком велик, и они уже теряют применимость, либо

физика удержания при больших  $B_{i0}$  существенно лучше, и достичь термоядерных параметров проще именно на этом пути.

Для параметров ST40, указанных в табл. 5 и в [12, 13], суммарный ток по тороидальной обмотке 6 МА, а плотность тока по медному проводнику может достигать 150 МА/м<sup>2</sup>. При такой большой плотности тока и допустимом перегреве тёплой меди ~70 °С длительность плато тока не превышает 0,5 с. Для достижения проектной длительности разряда 3 с [12] уже недостаточно просто несколько расширить диапазон изменения температуры меди в ходе нагрева, как в MAST-U (от -20 до 100 °С), но необходимо более глубокое захлаживание обмотки перед каждым импульсом. В [12] указано, что обмотки охлаждаются жидким азотом.

Использование метода формирования плазмы с помощью внешних полоидальных обмоток и перезапуска силовых линий магнитного поля (merging compression [14, 15]) позволяет существенно сэкономить затраты потока, фактически исключив резистивные затраты потока на стадии подъёма тока плазмы.

Из параметров, приведённых в табл. 5, следует, что вклад в поток от наружных полоидальных обмоток может составить 0,4 Вб (вертикальное равновесное магнитное поле  $B_{eq} \sim 0,8$  Тл для параметров табл. 5). Индуктивная составляющая потока  $L_{pl}I_{pl}$  для разряда ST40-G-P13  $\Delta\Psi_{ind} \approx 0,6$  Вб. Резистивное напряжение на обходе плазмы ~0,35 В (при скейлинге  $\tau_E, ITER$  с  $H_{y,2} = 1,4$ ) и ~0,07 В (при скейлингах  $\tau_E, Globus-2021$  и  $\tau_E, NSTX$ ). В целом требуемый запас потока в центральном соленоиде для 3 с импульса может быть оценен как ~0,4 Вб (при использовании скейлингов энергетического времени жизни плазмы Globus-2021 и NSTX) и более 1 Вб (при скейлинге ИТЭР).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проведена верификация кода GLOBSYS, первоначально разработанного для анализа и прогнозирования параметров и модификаций токамака Глобус-М2 [1], по экспериментальным и прогнозным данным сферических токамаков NSTX, NSTX-U, MAST, MAST-U и ST40.

В целом отмечено хорошее соответствие основных параметров плазмы между расчётами по коду GLOBSYS и базой данных NSTX, NSTX-U, MAST, MAST-U и ST40, приведённой в [2]. Наилучшее соответствие для времени удержания наблюдается при использовании скейлинга ИТЭР с небольшим улучшением удержания  $H_{y,2} = 1-1,2$ . Расчёты для скейлингов  $\tau_E$  Globus-2021 и NSTX хорошо соответствуют параметрам плазмы установок при тороидальном поле 0,5 Тл. По мере увеличения поля расчёты по этим скейлингам приводят ко всё более оптимистичным параметрам плазмы по сравнению со скейлингом ИТЭР, который можно назвать весьма консервативным.

Для данных токамаков NSTX, NSTX-U, MAST, MAST-U и ST40 оценено время выравнивания профилей параметров плазмы  $\tau_{LR}$ , которое можно назвать условием достижения квазистационарного горения плазмы. Это время сопоставлено с двумя техническими ограничениями на длительность разряда: по нагреву электромагнитной системы в течение импульса и по запасу потока. В рассмотренных вариантах параметров NSTX и MAST технические ограничения приводят к длительности разряда, меньшей  $\tau_{LR}$ . Для NSTX-U и MAST-U ситуация лучше, но в MAST-U при тороидальном поле 0,78 Тл уже необходимо небольшое захлаживание медной тороидальной обмотки перед разрядом (до -20 °С). В токамаке ST40 с полем на оси 3 Тл для обеспечения требуемой длительности разряда нужно уже глубокое захлаживание медной тороидальной обмотки (до температуры жидкого азота).

Полученные при сопоставлении данные позволили проверить используемые в коде соотношения и связи между параметрами. Они служат базой для прогнозирования параметров следующего шага программы Глобус-М, Глобус-М2.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (соглашение № 21-79-20133 от 24.03.2021 между РФФ и АО «НИИЭФА»).

## 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-M2. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып. 3, с. 37.
2. **Menard J.E., Majeski R., Ono M., Bakharev N.N., Gusev V.K. et al.** Fusion energy development applications utilizing the spherical tokamak and associated research needs and tools. — In: 27th IAEA FEC. Ahmedabad, India, 2018, OV/P-6.
  3. **Menard J.E., Gerhardt S., Bell M., Bialek J., Brooks A. et al.** Overview of the physics and engineering design of NSTX upgrade. — Nucl. Fusion, 2012, vol. 52, p. 083015; см. также: **Menard J., Canik J., Chrzanowski J., Denault M., Dudek L. et al.** Overview of the physics and engineering design of NSTX upgrade. — In: The 38th IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS) and 24th Symposium on Fusion Engineering (SOFE). Chicago, USA, 2011.
  4. **Kurskiev G.S., Bakharev N.N., Chernyshev F.V., Gusev V.K., Khromov N.A., Kiselev E.O., Krikunov S.V., Minaev V.B., Miroshnikov 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., Tukhmenova 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.
  5. **Menard J.E., Canik J., Covele B., Kaye S., Kessel C. et al.** Physics design of the NSTX upgrade. — In: 37th EPS Conference on Plasma Physics. Dublin, Ireland, 2010, p. 2.106.
  6. **Голиков А.А., Кутеев Б.В.** Усовершенствованная модель для анализа плазменных характеристик токамака с интенсивной реакцией ядерного синтеза. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2012, т. 35, вып. 1, с. 45.
  7. **Menard J.E.** Compact steady-state tokamak performance dependence on magnet and core physics limits. — Phil. Trans. Royal Society, A 377: 20170440, 2019.
  8. **Menard J., Fredrickson E., Gates D., Goldston R., Kaye S. et al.** Flux consumption optimization and the achievement of 1 MA discharges on NSTX. — In: 27th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. Budapest. Report EXP1-05, ECA, 2000, vol. 24B, p. 1441.
  9. **Thompson V., Voss G., Katramados I., Harte M.** MAST upgrade centre column design and analysis. — Fusion Engineering and Design, 2011, vol. 86, issues 6—8, p. 1398.
  10. **Morris W., Milnes J., Barrett T., Challis C., Chapman I. et al.** MAST accomplishments and upgrade for fusion next-steps. — IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, vol. 42, № 3, p. 402; см. также: **Martin R.** On behalf of the MAST Team, MAST Upgrade. — Construction Status and Early Research Plans, FIP/P8-26.
  11. **Dnestrovskij A.Yu., Connor J.W., Gryaznevich M.P.** On the confinement modeling of a high field spherical tokamak ST40. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2019, vol. 61, p. 055009.
  12. **Gryaznevich M., Asunta O. and Tokamak Energy Ltd. Team.** Overview and status of construction of ST40. — Fusion Engineering and Design, 2017, vol. 123, p. 177 (Proceedings of the 29th Symposium on Fusion Technology (SOFT-29). Prague, Czech Republic, 2016).
  13. **Gryaznevich M.** For the tokamak energy Ltd Team, ST path to fusion: first results from ST40. — In: 45th EPS Conference on Plasma Physics. Prague, Czech Republic, 2018, P2. 1077.
  14. **Gryaznevich M.P., Sykes A.** Merging-compression formation of high temperature tokamak plasma. — Nucl. Fusion, 2017, vol. 57, № 7, p. 072003.
  15. **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 Conference on Plasma Physics. Belfast, Northern Ireland, 2017, P. 4. 156.

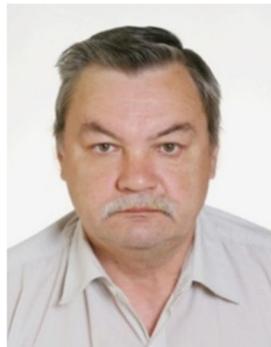
АО «НИИЭФА» им. Д.В. ЕФРЕМОВА, 196641 САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, пос. МЕТАЛЛОСТРОЙ,  
ДОРОГА НА МЕТАЛЛОСТРОЙ 3, РОССИЯ



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



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



Игорь Юрьевич Родин, заместитель генерального директора по термоядерным и магнитным технологиям АО «НИИЭФА», научный руководитель приоритетного направления «сверхпроводимость» ГК «Росатом», к. техн. н., ветеран 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, РОССИИ**



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



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



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



Евгений Олегович Кисельёв, аспирант



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



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 1 сентября 2021 г.

После доработки 17 сентября 2021 г.

Принята к публикации 28 сентября 2021 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып. 4, с. 43—53.