

УДК 533.9, 004.94

ВЕРИФИКАЦИЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Д.И. Алексеев¹, Э.Н. Бондарчук¹, А.А. Воронова¹, А.А. Кавин¹, А.М. Кудрявцева¹, А.Н. Лабузов¹,
М.В. Манзук¹, В.Б. Минаев², Ю.В. Петров², И.Ю. Родин¹, Н.В. Сахаров², О.Г. Филатов¹

¹АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

В данной работе представлены результаты верификации расчётов напряжённо-деформированного состояния электромагнитной системы, включающей в себя обмотки полоидального и тороидального магнитного поля, опорную конструкцию, межблочные и силовые структуры сферического токамака Глобус-М2, на основе измерений перемещений катушки тороидального поля под действием на неё всех электромагнитных сил, действующих при проведении экспериментов на данной установке. В серии экспериментов с близкими к максимальным значениями тока плазмы и тороидального магнитного поля были проведены измерения перемещений внешних частей обмотки тороидального поля в этом направлении под действием электромагнитных сил относительно начального положения. По измеренным при проведении экспериментов токам в обмотках тороидального, полоидального магнитных полей и току плазмы на построенной полномасштабной 3D-модели токамака Глобус-М2 были рассчитаны электромагнитные нагрузки. Полученные электромагнитные силы были использованы для расчёта напряжённо-деформированного состояния электромагнитной системы установки Глобус-М2 в программной среде ANSYS. Результаты выполненных расчётов показывают, что предложенный подход, состоящий из двух этапов — расчёт электромагнитных нагрузок на полномасштабной 3D-модели и определение механического отклика конструкции, верифицирован экспериментально для электромагнитной системы установки Глобус-М2 и может применяться на других токамаках.

Ключевые слова: сферический токамак Глобус-М2, магнитная система, обмотка тороидального магнитного поля, электромагнитные нагрузки, напряжённо-деформированное состояние.

VERIFICATION OF THE MAGNET SYSTEM FINITE ELEMENT MODEL BASED ON THE MEASUREMENTS IN EXPERIMENTS ON SPHERICAL TOKAMAK GLOBUS-M2

D.I. Alekseev¹, E.N. Bondarchuk¹, A.A. Voronova¹, A.A. Kavin¹, A.M. Kudriavtseva¹, A.N. Labusov¹,
M.V. Manzuk¹, V.B. Minaev², Yu.V. Petrov², I.Yu. Rodin¹, N.V. Sakharov², O.G. Filatov¹

¹JSC «NIEFA», St. Petersburg, Russia

²Ioffe Institute of Physics and Technology, St. Petersburg, Russia

This paper presents the verification results of stress analysis of the Globus-M2 spherical tokamak magnet system based on measurements carried out in experiments. Magnet system comprised Toroidal and Poloidal Field Coils, intercoil and supporting structures is subjected during experiment to the acting of electromagnetic (EM) loads. In the series of experiments with close to the maximum values of the plasma current and toroidal field, the Toroidal Field Coil displacements in the toroidal direction under EM loads relative to its natural position were measured using the high-speed camera. The EM loads were determined using 3D-model of the Globus-M2 tokamak magnet system from the currents of the Toroidal, Poloidal Field Coils and plasma measured in experiments. These loads were used for the stress analysis of the Globus-M2 magnet system in the ANSYS software. Results of work have shown that the approach consisting of two stages — the reconstruction of the EM loads and the determination of the mechanical response of the structure, has been successfully verified for the EM system of the Globus-M2 and can be used for other tokamaks.

Key words: spherical tokamak Globus-M2, magnet system, toroidal field coil, electromagnetic loads, stress analysis.

DOI: 10.21517/0202-3822-2022-45-4-61-68

ВВЕДЕНИЕ

Сферический токамак Глобус-М2 [1] был собран и запущен в работу в ФТИ им. А.Ф. Иоффе весной 2018 г. По существу, это была глубокая модернизация установки Глобус-М (1999—2016 гг.) [2]. Основной целью модернизации было создание возможностей для применения методов дополнительного нагрева и безындукционной генерации тока в компактном сферическом токамаке [3—5]. Создание новой электромагнитной системы (ЭМС) позволило в 2,5 раза увеличить тороидальное магнитное поле и

ток плазмы. Электромагнитные нагрузки на обмотку тороидального магнитного поля при увеличении поля и тока растут квадратично ($\sim B_t^2$ и $B_t I_p$).

Проектные параметры токамака Глобус-М2: $B_t = 1$ Тл, $I_p = 0,5$ МА, длительность разряда $\Delta t_{\text{pulse}} = 0,5$ с. К настоящему времени достигнуты значения $B_t = 0,9$ Тл, $I_p = 0,44$ МА, $\Delta t_{\text{pulse}} = 0,22$ с [6]. Следующим шагом программы Глобус предполагается дальнейшее увеличение параметров плазмы при увеличении тороидального магнитного поля до $B_t = 1,5$ Тл, тока плазмы до 0,8 МА и длительности разряда до $\Delta t_{\text{pulse}} \approx 4$ с. Проектные работы в этом направлении ведутся в кооперации АО «НИИЭФА»—ФТИ им. А.Ф. Иоффе на базе имеющейся инфраструктуры токамака Глобус-М2.

Современные методы проектирования, основанные на компьютерно-ориентированных конструировании (CAD — computed-aided design) и анализе (CAE — computed-aided engineering), позволяют провести численный анализ виртуальной конструкции в условиях эксплуатации с целью выбора и/или проверки принимаемых конструктивных решений. В связи с этим корректное описание механического поведения установки является обязательным условием для применяемых компьютерных моделей. Результаты расчёта напряжённо-деформированного состояния (НДС), выполненного с применением компьютерных моделей, являются исходными данными для оценки прочности и ресурса электромагнитной системы и силовых структур установки. В данной статье представлены результаты верификации механической модели ЭМС Глобус-М2 на основе экспериментальных данных.

Электромагнитная система установки Глобус-М2 состоит из центрального соленоида, обмоток тороидального (ОТП) и полоидального поля (ОПП). ОТП состоит из 16 одновитковых катушек, соединённых последовательно и усиленных двумя рядами силовых межблочных структур. Центральный соленоид и четыре пары обмоток полоидального поля расположены между вакуумной камерой и катушками тороидального поля. Две пары обмоток полоидального поля находятся снаружи ОТП. Все обмотки полоидального поля фиксируются в кронштейнах, которые крепятся к катушкам тороидального поля. Обратный виток обмотки ОТП состоит из двух шин, которые расположены внизу электромагнитной системы. На рис. 1 показано полоидальное сечение токамака. Следует отметить, что ЭМС токамака симметрична относительно средней плоскости, а соответствующие полоидальные обмотки сверху и снизу соединены электрически последовательно.

В результате взаимодействия тороидального магнитного поля и тока в ОТП возникают силы, лежащие в плоскости ОТП. Эти силы толкают катушку по радиусу к центру установки и пытаются разорвать её в

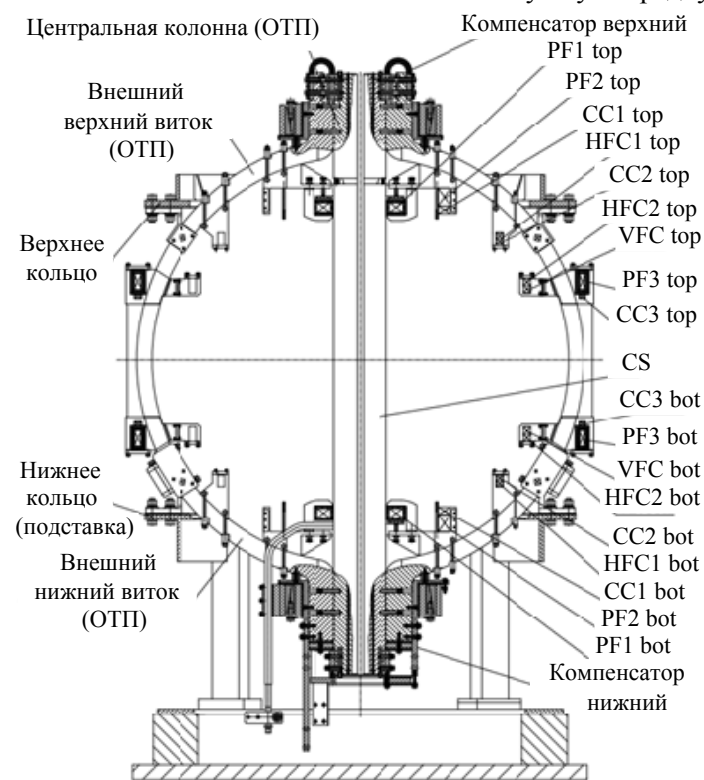


Рис. 1. Полоидальное сечение токамака Глобус-М2

полоидальном направлении. Радиальная сила воспринимается центральной колонной, образованной вертикальными частями ОТП, расположенными вблизи оси токамака. Вертикальные силы воспринимаются растяжением ОТП в полоидальном направлении.

В результате взаимодействия тока в ОТП с полоидальными магнитными полями возникают электромагнитные силы, действующие из плоскости ОТП и стремящиеся их опрокинуть. Эти силы передаются с ОТП на силовые кольца, крестовые распорки и, частично, на тороидальные силовые пояса (межблочные структуры). Весовая нагрузка передаётся через нижнее силовое кольцо на весовые опоры. Во время рабочего импульса в результате действия электромагнитных сил наблюдается оптически регистрируемое тороидальное смещение ОТП от исходного положения.

Для подтверждения корректности используемых расчётных методов была выполнена верификация разработанной конечно-элементной (КЭ) модели электромагнитной системы

Глобус-М2, проведено сравнение результатов измерений и результатов численного расчёта. Результаты механических измерений представляют собой тороидальные перемещения катушек тороидального поля при разрядах установки. Для верификации были выбраны разряды № 40 358, № 40 359 и № 40 360. Электромагнитные силы в ЭМС были рассчитаны по токам в обмотках и току плазмы, которые записывались системой сбора данных установки в этих разрядах. Полученные электромагнитные силы были использованы в механическом расчёте в качестве входной нагрузки.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 С ЦЕЛЮ ВЕРИФИКАЦИИ РАСЧЁТНЫХ ПРОЧНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ НА БАЗЕ ИЗМЕРЕНИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

С целью верификации расчётных прочностных моделей на базе измерений перемещений обмотки тороидального поля с помощью оптических приборов на токамаке Глобус-М2 в середине 2021 г. был выполнен ряд экспериментов с максимально достигнутыми в ходе их проведения током плазмы 0,4 МА и тороидальным магнитным полем 0,8 Тл. При таких параметрах перемещения наиболее существенны.

В экспериментальном зале токамака Глобус-М2 было установлено следующее оборудование:

- скоростная камера Photron SA5(1000 FPS), блок питания, кабель Ethernet, пульт управления;
- объектив Nikon afs-nikkor 17—35 мм;
- объектив Nikon afs-nikkor 80—200 мм;
- объектив Nikon af micro nikkor 60 мм;
- ноутбук с установленным специализированным ПО для работы со скоростной камерой.

Расположение фотокамеры на штативе вблизи токамака показано на рис. 2.

Объектив скоростной камеры Photron SA5 был сфокусирован на верхней части внешних витков ОТП, где, согласно предварительным расчётам, ожидалось наибольшее смещение в период рабочего импульса.

Измеренные данные всех токов обмоток и тока плазмы в разрядах были записаны системой сбора в базу данных установки для дальнейшего проведения расчётов электромагнитных нагрузок на ЭМС.

На рис. 3 для примера показаны фотографии

одной тороидальной катушки в области ожидаемых наибольших перемещений, выполненные скоростной камерой Photron SA5, до разряда и в момент разряда, когда её смещение максимально.

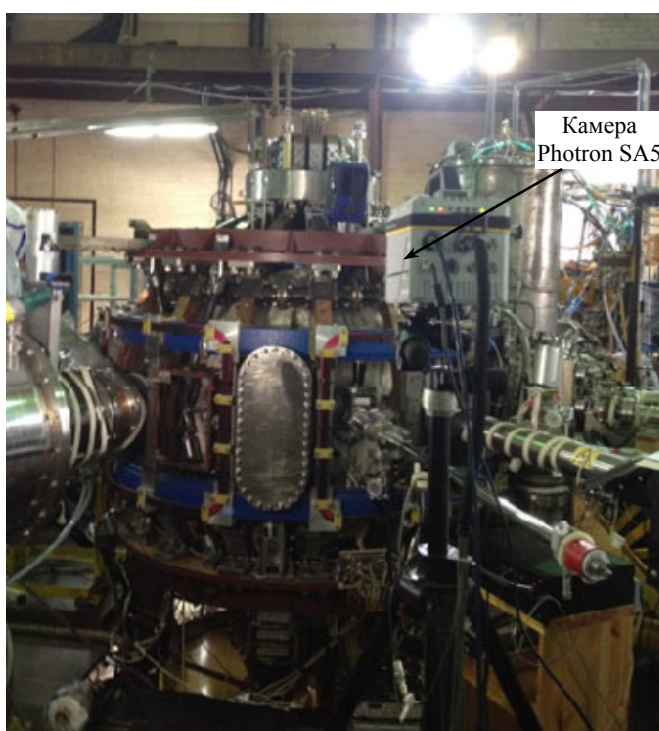


Рис. 2. Токamak Глобус-М2

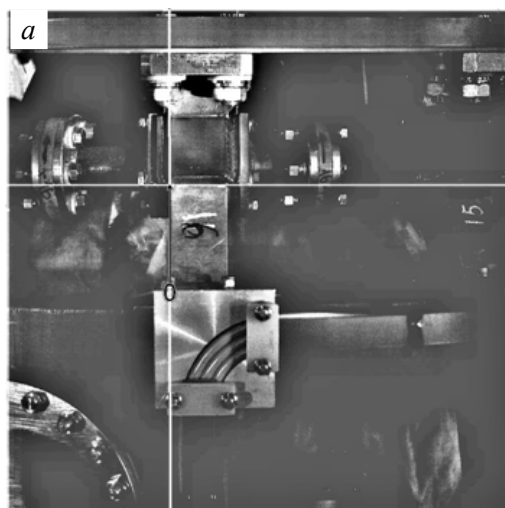


Рис. 3. Фотографии одной тороидальной катушки до рабочего импульса (а) и в момент рабочего импульса, когда её смещение максимально (б)



Эволюции тока плазмы и токов обмоток в разрядах № 40 358, № 40 359 и № 49 360 показаны на рис 4—6. Обмотки токамака с их названиями показаны на рис. 1. Пунктирными линиями показан момент времени максимального смещения ОТП.

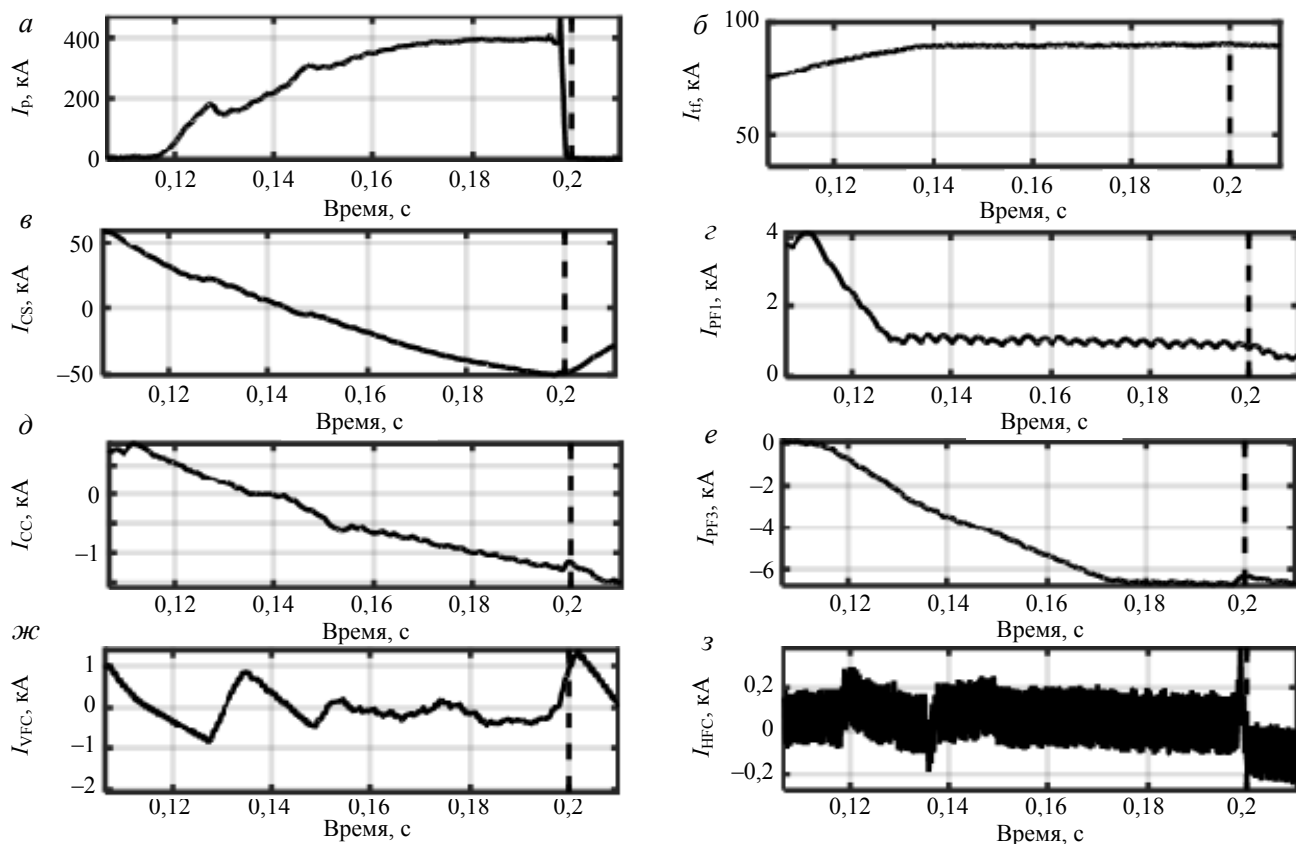


Рис. 4. Ток плазмы I_p (а), ток ОТП I_{OTF} (б), ток индуктора I_{CS} (в), ток обмотки PF1 I_{PF1} (г), ток обмотки CC I_{CC} (д), ток обмотки PF3 I_{PF3} (е), ток обмотки VFC I_{VFC} (ж), ток обмотки HFC I_{HFC} (з) в разряде № 40 358

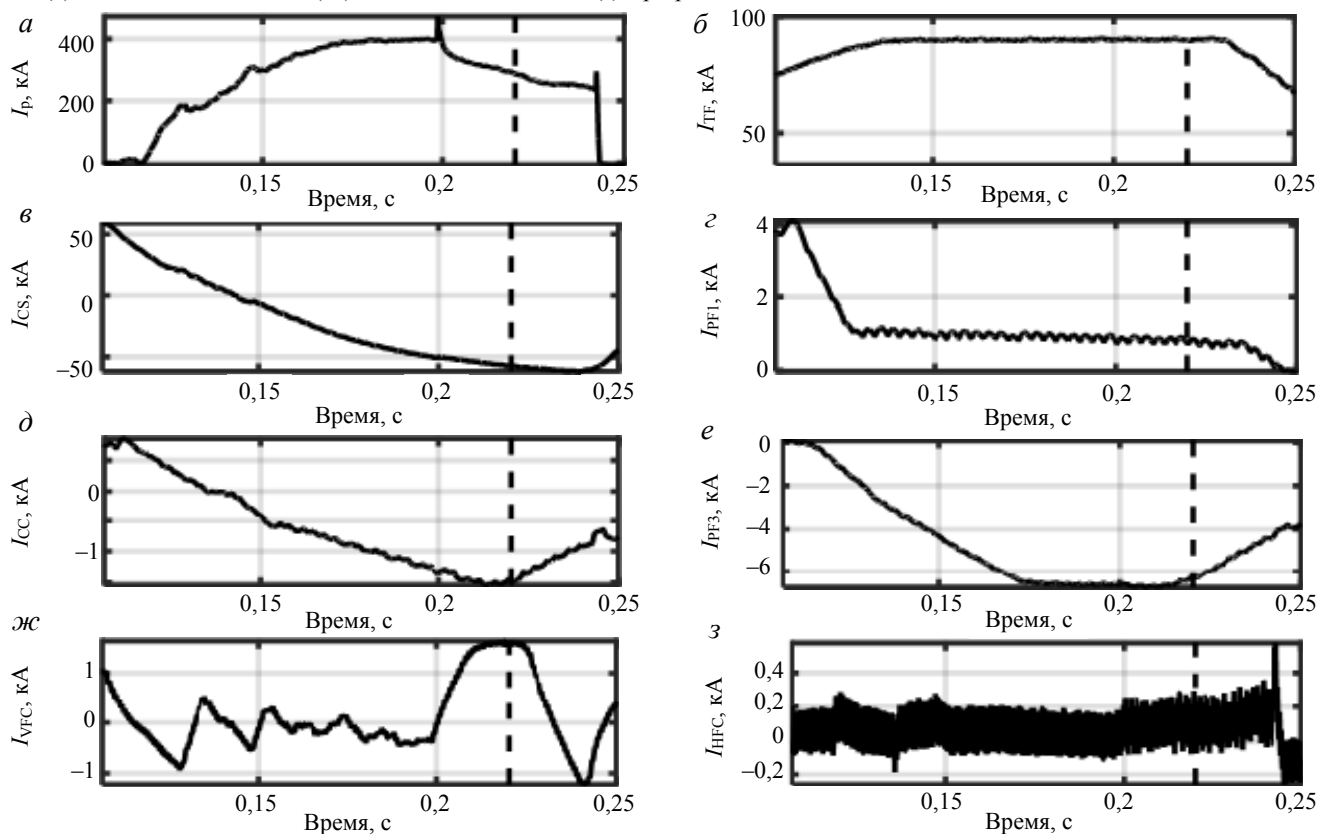


Рис. 5. То же, что на рис. 4, в разряде № 40 359

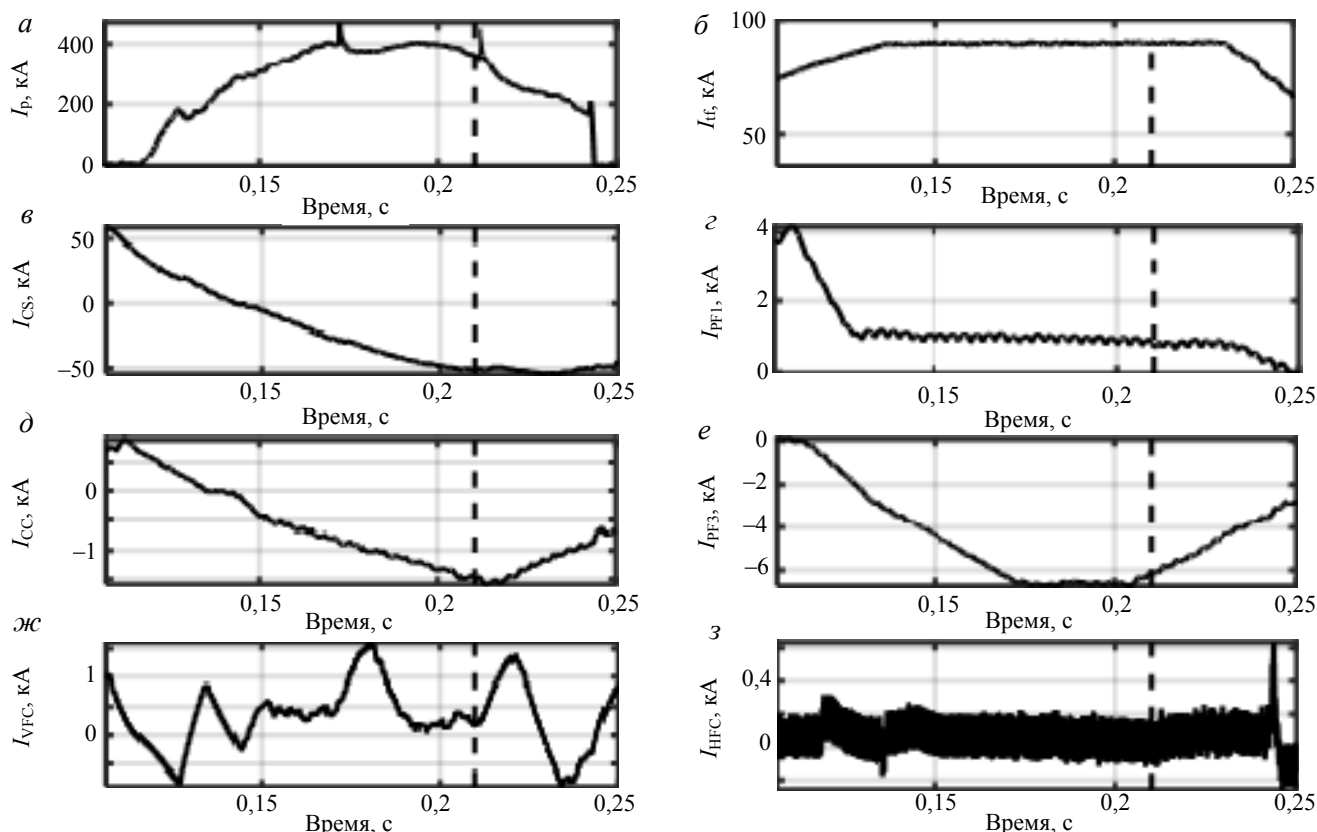


Рис. 6. То же, что на рис. 4, в разряде № 40 360

Полученные данные были использованы в расчёте электромагнитных нагрузок.

РАСЧЁТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ НАГРУЗОК НА ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

По измеренным в экспериментах токам в ОТП, полоидальных обмотках и в плазме были определены электромагнитные нагрузки на полномасштабной 3D-модели электромагнитной системы токамака Глобус-М2. Расчёт выполнен с помощью программного кода ANSYS.

Расчётная модель. В силу симметрии расположения элементов ЭМС в тороидальном направлении в расчёте использована модель 1/2 ЭМС установки, включающая восемь тороидальных катушек, 180-градусных секторов центрального соленоида и полоидальных обмоток. Обмотки полоидального поля, центральный соленоид, ОТП и плазма моделируются как трёхмерные проводники с однородной плотностью тока в сечении. Положительное направление тока выбрано против часовой стрелки относительно вертикальной оси установки, если смотреть сверху, и совпадает с положительным направлением возрастания угла φ в глобальной цилиндрической системе координат.

Ток полоидальных обмоток I_{pl} и ток плазмы I_p в указанных разрядах в моменты времени максимальных смещений ОТП t приведены в табл. 1. Максимальный ток в катушках тороидального поля во всех вариантах составляет 90 кА. На рис. 7 показана конечно-элементная модель для расчёта электромагнитных сил.

Т а б л и ц а 1. Ток в катушках полоидального поля и ток плазмы в разрядах

Тип катушки	№ 40 358, $t = 200$ мс, $I_{pl} = 0$ кА	№ 40 359, $t = 220$ мс, $I_{pl} = 288$ кА	№ 40 360, $t = 210$ мс, $I_{pl} = 362$ кА
CS	-48,2	-57,3	-50,9
PF1	0,76	0,766	0,748
PF2	0	0	0
PF3	-6,3	-6,26	-6,1
CC	-1,15	-1,47	-1,48
OV	0,97	1,53	0,194
HFC	0	0,1	0

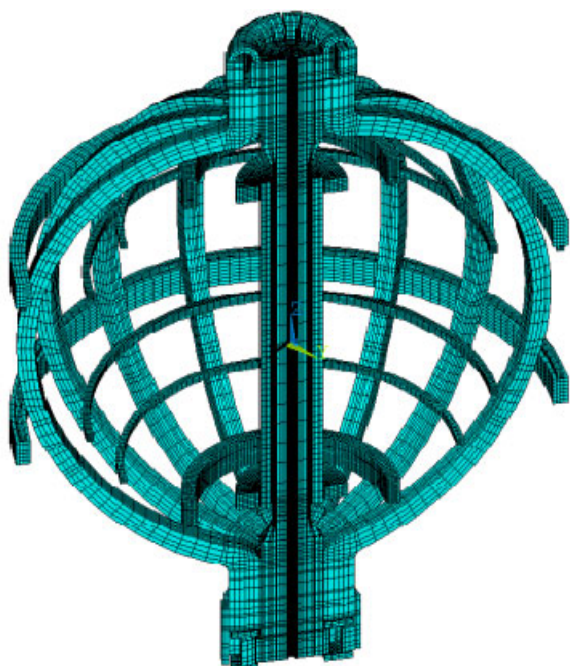


Рис. 7. Трёхмерная конечно-элементная модель (расчёт электромагнитных нагрузок)

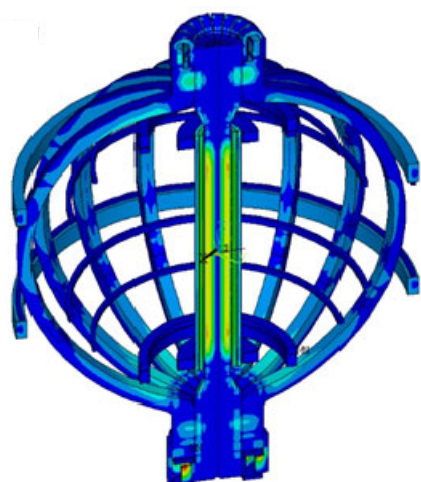


Рис. 8. Распределение векторов суммарных сил на токонесущие элементы (в Н) для разряда № 40 358, ток в плазме 0 кА

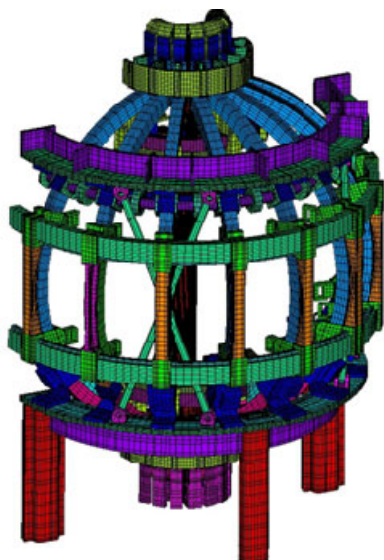


Рис. 9. Конечно-элементная модель установки Глобус-М2 (механический расчёт)

Результаты расчёта. Получено распределение трёхмерного магнитного поля, рассчитаны статически эквивалентные узловые силы, необходимые для расчёта механической прочности системы, для разрядов № 40 358, № 40 359 и № 49 360. На рис. 8 показано распределение суммарных векторов электромагнитных сил на элементы магнитной системы установки для разряда № 40 358. Распределения суммарных векторов электромагнитных сил в разрядах № 40 359 и № 40 360 выглядят аналогично и различаются величиной.

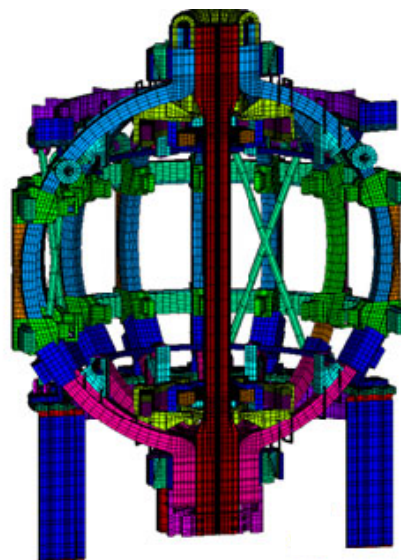
Следует подчеркнуть, что на каждую из 16 катушек тороидального магнитного поля действуют интегральная радиальная сила $\approx 0,4$ МН, направленная к центру установки, и опрокидывающий радиальный момент ≈ 7 кН·м.

Результаты данного расчёта были использованы при проведении расчётов напряжённо-деформированного состояния ЭМС.

РАСЧЁТ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ (НДС) ЭМС

Реконструированные электромагнитные силы были использованы для расчёта напряжённо-деформированного состояния электромагнитной системы установки Глобус-М2 в программной среде ПО ANSYS. Для расчёта использовалась глобальная конечно-элементная пространственная модель 1/2 конструкции ЭМС Глобус-М2, включающая в себя восемь катушек ОТП, межблочные и силовые структуры, обмотки полоидального поля и опорную конструкцию (рис. 9).

Все расчёты были выполнены для сектора 180° с учётом условий циклической симметрии. Граничным условием является заделка (нулевые перемещения по трём направлениям) на границе опор.



Результаты расчёта. На рис. 10 показаны тороидальные перемещения конструкции в разряде № 40 358. Перемещения конструкции в разрядах № 40 359 и № 40 360 выглядят аналогично и различаются величиной.

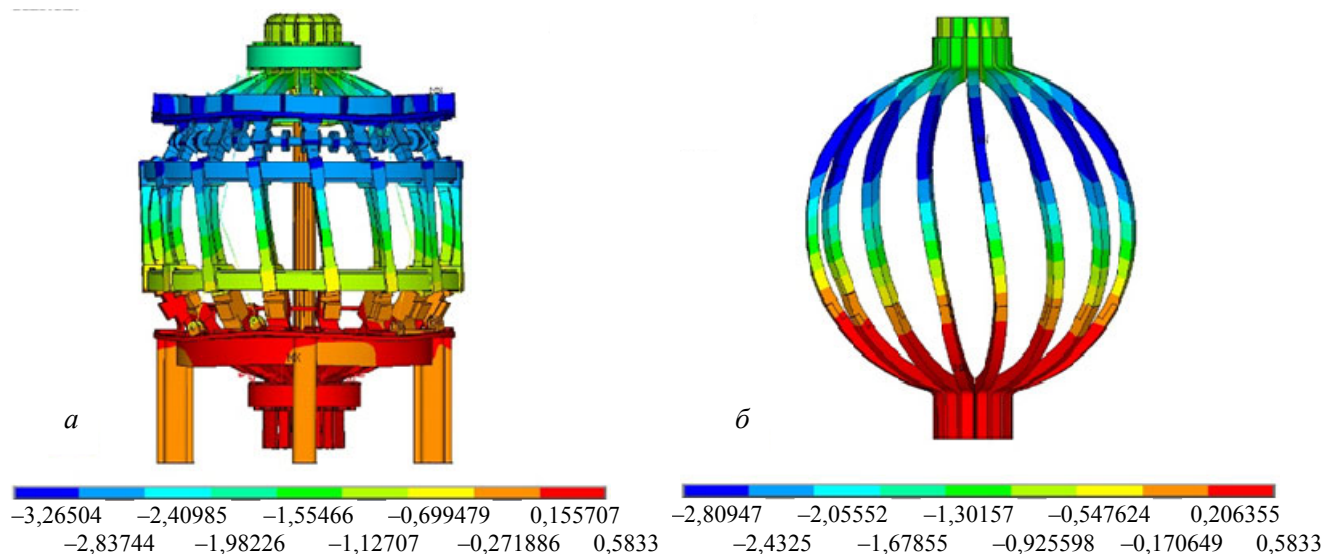


Рис. 10. Расчётные тороидальные перемещения в разряде № 40 358, мм: а — ЭМС установки; б — ОТП

По результатам механического расчёта были определены перемещения ОТП в тороидальном направлении для трёх различных разрядов № 40 358, № 40 359 и № 40 360. Сравнение результатов, полученных расчётным путём и измеренных в ходе работы установки Глобус-М2, представлено в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Сравнение результатов, полученных расчётным путём и измеренных в ходе работы установки Глобус-М2

№ разряда	Результат расчёта, мм	Результат измерений, мм	Отклонение расчётных значений от измеренных, %
40 358	2,81	2,4	+17
40 359	2,042	2,0	+21
40 360	2,037	2,4	–1

По результатам обработки фотосъёмки точность измерений оценивалась примерно $\pm 0,4$ мм. Приведённое сопоставление результатов показывает соответствие измеренных и расчётных перемещений ОТП ЭМС установки в пределах точности измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью верификации САЕ-модели электромагнитной системы Глобус-М2 были выполнены следующие шаги:

- в ходе экспериментов на установке измерены перемещения катушек тороидального магнитного поля в этом направлении;
- по результатам экспериментов рассчитаны электромагнитные нагрузки, действующие на токопроводящие элементы ЭМС;
- выполнен механический расчёт установки Глобус-М2 под действием рассчитанных по результатам экспериментов электромагнитных сил.

Результаты выполненных расчётов НДС были сопоставлены с экспериментальными измерениями тороидального перемещения ОТП и показали достаточно хорошее совпадение в пределах точности измерений.

Таким образом, предложенный подход, состоящий из двух этапов — реконструкции электромагнитных нагрузок на полномасштабной 3D-модели и определения механического отклика конструкции, экспериментально верифицирован для ЭМС установки Глобус-М2 и может применяться на других токамаках.

Авторы выражают признательность Михаилу Владимировичу Хохлову за оказанную помощь при проведении данного исследования — вклад в разработку и тестирование модели для механических расчётов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (соглашение № 21-79-20133 от 24.03.2021 между РФФИ 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. Minaev V.B. et al. — Nucl. Fusion, 2017, vol. 57, p. 6.
2. Gusev V.K. et al. — Techn. Phys., 1999, vol. 44, p. 9.
3. Gusev V.K. et al. — Nucl. Fusion, 2011, vol. 51, p. 10.
4. Gusev V.K. et al. — Allow, 2013, vol. 53, p. 9.
5. Gusev V.K. et al. — Allow, 2015, vol. 55, p. 10.
6. 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., Курский Г.С., Киселев 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.

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



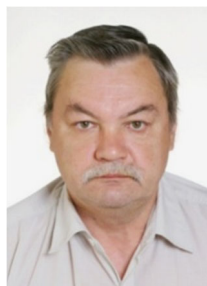
Дмитрий Игоревич Алексеев, начальник лаборатории сильноточных коммутационных аппаратов



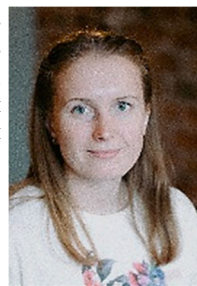
Эдуард Николаевич Бондарчук, начальник отдела, к. техн. н., лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности bondar@sintez.niiefa.spb.su



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



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



Анна Михайловна Кудрявцева, математик 1 категории am.kudr95@gmail.com



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



Максим Витальевич Манзук, начальник отдела сильноточной коммутационной аппаратуры

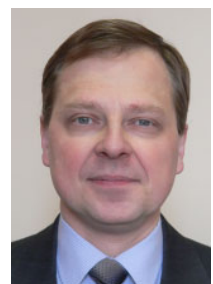


Игорь Юрьевич Родин, заместитель генерального директора по АО «НИИЭФА», научный руководитель направления ГК «Росатом», к. техн. н., ветеран атомной энергетики и промышленности rodin@sintez.niiefa.spb.su

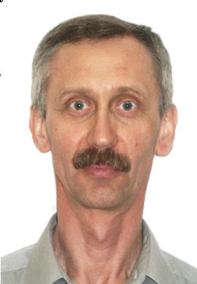


Олег Геннадьевич Филатов, научный руководитель АО «НИИЭФА», д.ф.-м.н., Золотая медаль имени И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности filatovog@niiefa.spb.su

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



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



Юрий Викторович Петров, с.н.с., к.ф.-м.н., лауреат премии Правительства РФ yu.petrov@mail.ioffe.su



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

Статья поступила в редакцию 14 сентября 2022 г.

После доработки 3 октября 2022 г.

Принята к публикации 5 октября 2022 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 4, с. 61—68.