

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 533.951.7

ВЕРИФИКАЦИЯ ТРЕХМЕРНОЙ САПР-МОДЕЛИ ТОКАМАКА Т-15МД

© 2024 г. И. А. Шелегеда^{а, б, *}, М. А. Драбинский^а, М. В. Талалай^{а, б}, И. А. Назаров^с

^аНИИЦ “Курчатовский институт”, пл. Академика Курчатова, 1, Москва, 123182 Россия

^бМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (НИУ),
ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, г. Москва, 1005005 Россия

^сАО “ГСПИ”, Шарикоподшипниковская ул., д. 4, г. Москва, 115088 Россия

*E-mail: shelegeda01@student.bmstu.ru

Поступила в редакцию 28.04.2023 г.

После доработки 04.07.2023 г.

Принята к публикации 10.07.2023 г.

Для проектирования диагностико-технологического комплекса токамака Т-15МД используется трехмерная компьютерная модель (САПР-модель), включающая все конструктивные элементы токамака и окружающие его системы: системы нагрева и диагностики плазмы, технологические системы (вакуумная откачка, сбор данных и т.д.). Использование САПР-модели позволяет на этапе проектирования учитывать взаимное расположение соседних систем и геометрию конструкций токамака, таким образом обеспечить интеграцию в него дополнительных систем. Такой подход используется при проектировании ITER, а для российских токамаков применяется впервые. Для обеспечения наиболее полного соответствия САПР-модели реальному токамаку необходимо произвести ее верификацию. В работе представлены алгоритм верификации САПР-модели диагностико-технологического комплекса токамака Т-15МД, осуществляемая по данным лазерного геодезического сканирования, и результаты оценки точности выполненных работ.

Ключевые слова: САПР-модель, верификация, метрология, токамак Т-15МД

DOI: 10.56304/S2079562923030314

1. ВВЕДЕНИЕ

Проектирование диагностико-технологического комплекса токамака Т-15МД [1, 2], в который входят системы диагностики, управления и нагрева плазмы, технологические системы токамака и прочие элементы окружения Т-15МД, ведется с использованием единой для всех систем трехмерной компьютерной САПР-модели (см. рис. 1а) [3]. Отдельные узлы проектируются параллельно разными научными коллективами, их трехмерные модели затем интегрируются в САПР-модель комплекса Т-15МД. Такой подход обладает следующими преимуществами:

- возможность одновременного параллельного проектирования различных систем;
- возможность учета расположения элементов отдельных систем и узлов при совместном проектировании для обеспечения их бесконфликтного взаимного расположения;
- возможность согласованного использования элементов конструкции токамака Т-15МД (экваториальных фланцев, систем вакуумной откачки, электропитания и т.д.) различными коллективами.

Для корректного использования данного подхода необходимо убедиться, что элементы САПР-модели токамака и его окружения отражают реальные

элементы Т-15МД. Близкое расположение соседних вспомогательных систем друг к другу и к элементам токамака (катушкам магнитного поля, элементам окружения и т.д.) в ограниченном пространстве зала установки накладывает дополнительное требование к точности исполнения САПР-модели и последующих изготовления и монтажа систем. Пример близкого расположения соседних систем приведен на рис. 1б: элементы двойного диагностического комплекса зондирования плазмы пучком тяжелых ионов (ЗПТИ-1 и ЗПТИ-2) [4–6] расположены близко к диагностическому инжектору нейтральных атомов (ДИНА) [7] в одном сечении и к СВЧ-волноводу в другом [8]. Следовательно, для обеспечения совместной работы обеих систем, необходимо убедиться, что при их интеграции (монтаже) не произойдет пересечения их элементов и конфликтов геометрии.

Для учета возможных неточностей изготовления и монтажа рассмотрен способ верификации трехмерной модели Т-15МД (то есть проверки и коррекции ее отклонений от реальной геометрии) на основании данных лазерного геодезического сканирования. Высокая точность определения фактических координат электромагнитной

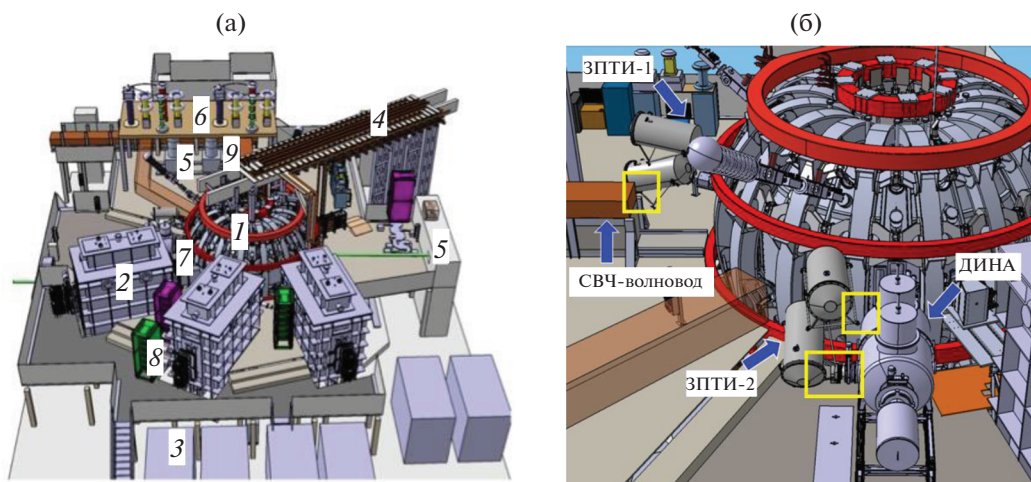


Рис. 1. (а) трехмерная САПР-модель токамака Т-15МД: 1 – токамак Т-15МД; 2 – инжекторы нейтральных частиц; 3 – система питания инжекторов нейтральных частиц; 4 – шинный мост; 5 – диагностическое оборудование ЗПТИ; 6 – высоковольтная система питания ЗПТИ; 7 – диагностический инжектор нейтральных атомов; 8 – диагностическое оборудование (рефлектометрия); 9 – СВЧ-волновод; (б) Близость расположения соседних элементов вспомогательных систем токамака Т-15МД (СВЧ-волновода, ЗПТИ, ДИНА).

системы критически важна для проведения расчетов равновесия и устойчивости плазмы [9, 10].

Результаты лазерного геодезического сканирования представлены в виде единого массива точек с единой системой координат – т.н. дискретная модель (см. рис. 2). Система координат, использованная при сканировании, отличается от системы координат, используемой в трехмерной модели комплекса. Эти системы координат требовалось совместить для определения точного положения выстраиваемых далее моделей объектов.

В данной статье во втором разделе приводится описание порядка проведения геодезических измерений. В третьем разделе описан метод совмещения САПР-модели комплекса Т-15МД и массива точек, полученного в результате лазерного сканирования токамака. В четвертом разделе описывается расчет погрешности геодезических измерений. Пятый раздел посвящен результатам первичной верификации трехмерной САПР-модели.

2. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Геодезические измерения комплекса Т-15МД включали в себя следующие работы:

- создание опорной и съемочной (плановой и высотной) сетей;
- проведению исполнительной съемки существующих строительных конструкций для восстановления строительных осей зала, где монтируется Т-15МД;
- проведению лазерного сканирования объекта;

– камеральные вычисления, уравнивание и создание цветной трехмерной точечной модели объекта.

В геодезических измерениях применялись электронный тахеометр LeicaTM50 [11, 12] и лазерный сканер Zoller + Frohlich GmbH IMAGER 5016 [13, 14]. В табл. 1 приведены основные характеристики тахеометра и лазерного сканера.

При проведении измерений было построено 3 планово-высотных сети: опорная сеть 1 ступени (зал установки), съемочная сеть 2 ступени (подвал, 1 этаж и диагностическую антресоль зала установки), съемочная сеть 3 ступени (внутренняя поверхность вакуумной камеры Т-15МД).

В соответствии с [15, 16] в качестве опорных точек для создания опорной сети в зале установки на высоте +13 м были размещены 10 отражателей ОП-15 (см. рис. 3а) на колоннах зала. Для создания съемочной сети 2 ступени были выставлены 3 опорных отражателя в подвале, 4 точки на 1 этаже и 8 отражателей на антресоли зала установки. Создание съемочной сети 3 ступени проводилось по реперным точкам внутри вакуумной камеры токамака (см. рис. 3б). Взаимное расположение опорных точек определялось с помощью тахеометра (см. табл. 1). Положение опорных точек определялось по результатам многократных измерений: $n = 12$ для каждой точки опорной сети и $n = 6$ для каждой точки съемочной сети.

Предрасчет точности выбранной методики был произведен в программе CREDO DAT [17, 18] в соответствии с выбранным количеством опорных точек, количеством измерений для выбранных точек, точностью средства измерения и максимальной измеряемой длины (не более 35 м). Уравни-

Таблица 1. Метрологические характеристики используемых средств измерений

Тахеометр электронный Leica TM50, Госреестр № 56482-14	
Наименьшее расстояние визирования	1.7 м
Диапазон измерений расстояний	
– в отражательном режиме	1.5–3500 м
– на отражающую пленку	1.5–250 м
Допускаемая погрешность измерения углов	±0.5"
Допускаемая погрешность измерения расстояний	
– в отражательном режиме	$\pm (0.6 + 1 \cdot 10^{-6} D)$ мм
– на отражающую пленку	$\pm (1 + 1 \cdot 10^{-6} D)$ мм
Сканер лазерный Zoller + Frohlich GmbH IMAGER 5016, Госреестр № 73136–18	
Диапазон измерений расстояний	0.3–365.0 м
Допускаемая погрешность измерения расстояний ($P = 0.95$)	$\pm 2 (1 + 10 \cdot 10^{-6} D)$ мм
Допускаемая погрешность измерения углов	±14"

вание результатов измерений по опорной и съемочной сети выполнялось в программе CREDO DAT PROFESSIONAL.

В построенной условной математической системе координат проводилось сканирование всего зала установки с применением лазерного сканера (см. табл. 1). С целью захвата полной поверхности рассматриваемых объектов количества серий измерений составило $n = 38$ для первого этажа, $n = 46$ для диагностической антресоли и $n = 17$ для внутренней поверхности камеры. Расположение сканера при сканировании указано серыми сферами.

Данные сканирования, полученные из разных положений сканера, объединялись в общую цветную трехмерную дискретную (точечную) модель комплекса Т-15МД (дискретная модель, см. рис. 2)

с помощью т.н. сшивки кадров, при помощи программы Z+F LaserControl [19].

3. СОВМЕЩЕНИЕ САПР-МОДЕЛИ Т-15МД И ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ

САПР-модель комплекса Т-15МД имеет систему координат с началом в центре магнитной системы токамака. Дискретная модель представлена в строительной системе координат. Для дальнейшей работы по верификации САПР-модели комплекса необходимо осуществить преобразование системы координат дискретной модели таким образом, чтобы данная система координат после преобразования совпадала с системой координат САПР-модели с наименьшими отклонениями.

Токамак имеет тороидальную симметрию, исходя из этого выбран способ преобразования си-

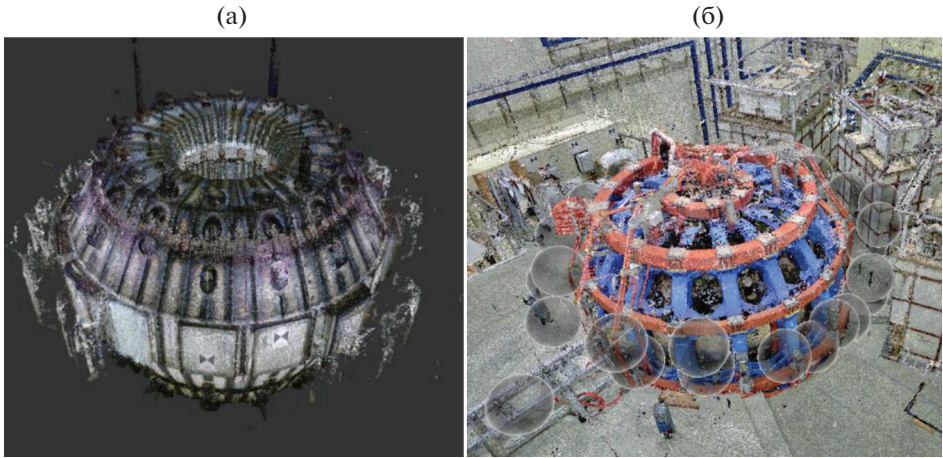


Рис. 2. Дискретная модель токамака Т-15МД: (а) вакуумная камера; (б) зал установки: серыми сферами отмечены места установки сканера.

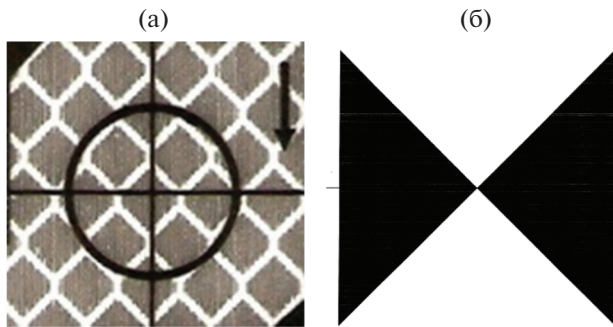


Рис. 3 Внешний вид реперов: (а) опорный отражатель ОП-15; (б) репер, использовавшийся для съемочных сетей 2 и 3 ступеней.

стемы координат результатов лазерного сканирования путем параллельного переноса с последующим поворотом (см. рис. 4).

Магнитная система токамака является основной установкой, так как именно она определяет конфигурацию плазмы при проведении экспериментов. При создании токамака наибольшие требования к точности изготовления и монтажа предъявляются именно к магнитной системе. Поэтому совмещение координатных систем САПР-модели и дискретной модели проводится с опорой на ее геометрию.

В горизонтальной плоскости xy преобразование осуществляется через совмещение оси магнитной системы токамака в САПР-модели z и реконструированной в дискретной модели оси магнитной системы z' . Такое совмещение задает углы наклона систем координат относительно вертикальных плоскостей (углы α и β на рис. 4).

Соответствие систем координат в вертикальном направлении h задается положением катушек полоидального поля (КПП), а именно по положению верхних и нижних горизонтальных граней КПП. Тороидальный угол γ определяется по геометрии катушек тороидального поля (КТП).

Координаты отдельных точек и поверхностей извлекались из дискретной модели при помощи инструментария программ *Autodesk ReCap* [20] и *PolyWorks Metrology Suite* [21]. На основе полученных данных строились трехмерные САПР-модели ребер и граней объектов. Полученный набор элементов вносился в верификационную САПР-модель, с которой проводилось сравнение исходной САПР-модели Т-15МД. Подробное описание элементов верификационной модели приведено в разделе 5. Пример измерения координат отдельных точек в дискретной модели камеры токамака приведен на рис. 5а. Черными метками указаны выбранные оператором точки на границе крепежных отверстий для пластин дивертора. Обозначение точек произвольно. На рис. 5б показаны импортированные в САПР-модель координаты отверстий для крепления пластин дивер-

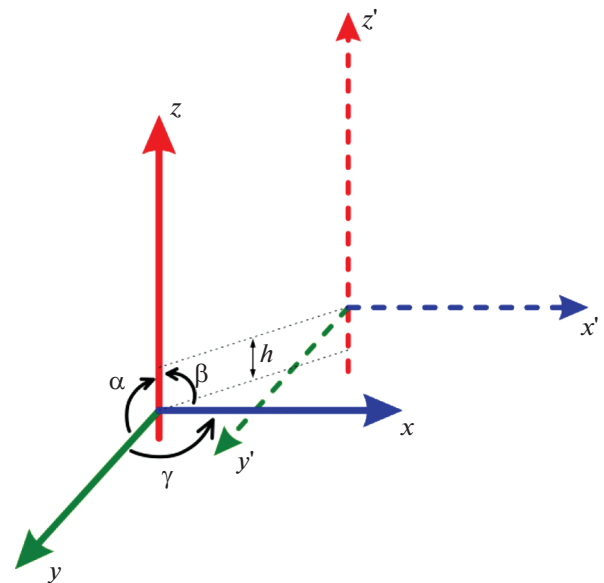


Рис. 4. Принципиальная схема совмещения координатных систем САПР-модели токамака Т-15МД (xyz) и результатов лазерного сканирования ($x'y'z'$).

тора и аппроксимированные поверхности ребер жесткости вакуумной камеры Т-15МД, полученные из дискретной модели.

Ось магнитной системы Т-15МД восстанавливалась по действительной геометрии катушек полоидального поля (КПП). Анализ формы КПП в дискретной модели (см. рис. 6а) показал, что внешняя и внутренняя поверхности КПП могут быть достаточно точно аппроксимированы цилиндрическими поверхностями. По результатам измерений величина максимального отклонения точек внешней поверхности КПП от поверхности цилиндра не превысило 3 мм, а радиальное среднеквадратичное отклонение положений геометрических центров разных катушек составило 12 мм. “Верификационная” ось магнитной системы Т-15МД была построена как усредненная ось для положений геометрических центров КПП, после чего ось магнитной системы в трехмерной модели и “верификационная” ось магнитной системы Т-15МД были совмещены.

Совмещение моделей по вертикали осуществлялось с использованием верхних и нижних поверхностей КПП, которые были аппроксимированы плоскостями (см. рис. 6а). Аппроксимированные плоскости сравнивались с поверхностями катушек в трехмерной модели. Таким образом были получены следующие данные – разница в расстоянии между соседними катушками в модели и на реальной установке, а также разница толщины катушек полоидального поля (их обечаяек) в САПР-модели комплекса и дискретной модели. Учет этих данных позволил найти среднее значение отклонения габаритных размеров и положения ка-

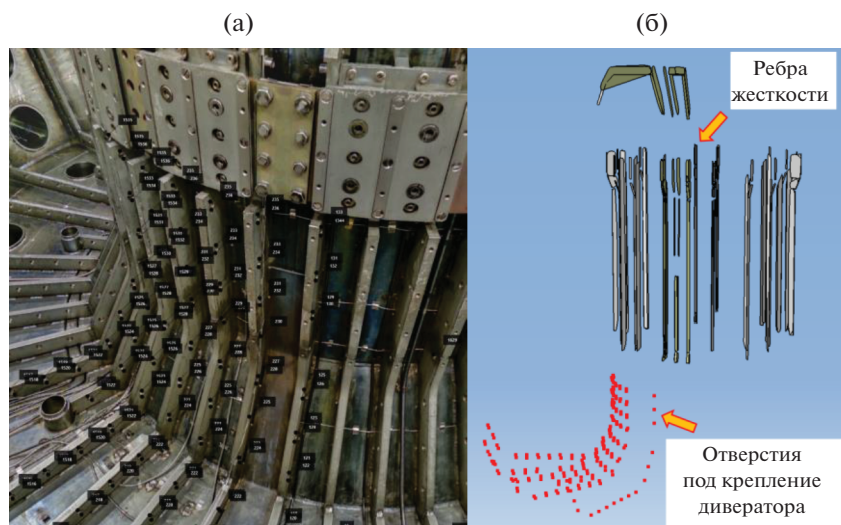


Рис. 5. (а) Извлечение из массива результатов лазерного сканирования координат отверстий для крепления пластин дивертора; (б) САПР-модели ребер жесткости внутреннего обвода вакуумной камеры Т-15МД и отверстий для крепления пластин дивертора.

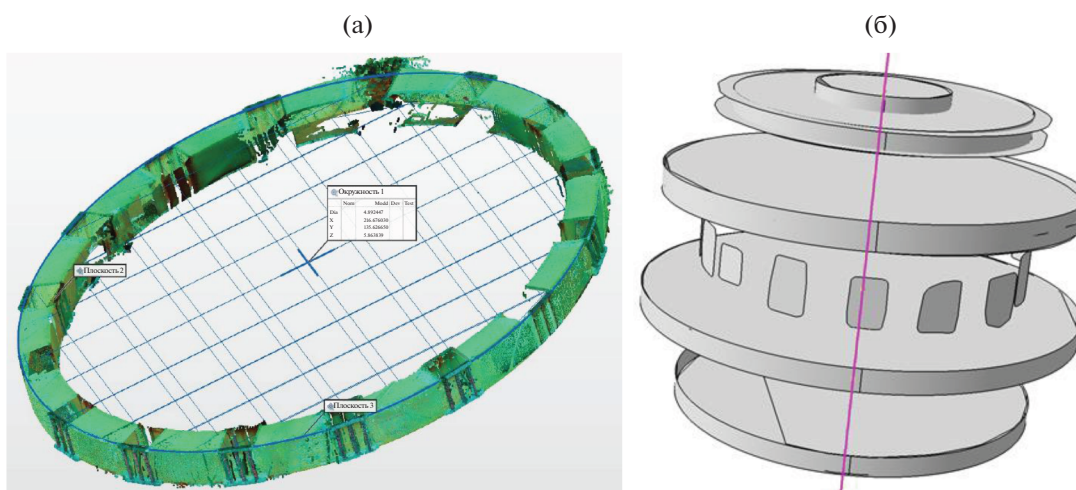


Рис. 6. (а) Аппроксимация геометрии поверхностей КПП цилиндрическими и плоскими поверхностями; (б) Поверхности катушек полоидального поля, экваториальных фланцев и ось магнитной системы токамака в САПР-модели.

тушек, что стало основой для совмещения систем координат по вертикали. Цилиндрические и плоские поверхности катушек, полученные из дискретной модели, и построенная на их основе ось магнитной системы токамака показаны на рис. 6б.

Заключительным этапом совмещения систем координат САПР-модели комплекса и верификационной САПР-модели стало совмещение по тороидальному углу γ . Для этого боковые поверхности катушек тороидального поля (КТП) в дискретной модели аппроксимировались плоскостями. Полученные плоскости переносились в трехмерную модель и при помощи составленной карты отклонений был найден средний сдвиг в тороидальном направлении. Это позволило наложить все 6 огра-

ничений (координаты x, y, z , два угла с вертикальными плоскостями и тороидальный угол) на систему координат верификационной модели. Импортёранные в верификационную САПР-модель поверхности КТП показаны на рис. 7.

4. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ВЕРИФИКАЦИИ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ТОКАМАКА Т-15МД

По результатам обработки полученного массива точек лазерного сканирования проведена верификация элементов компьютерной модели, однако о достоверности полученных оценок качества изготовления и монтажа объектов можно говорить

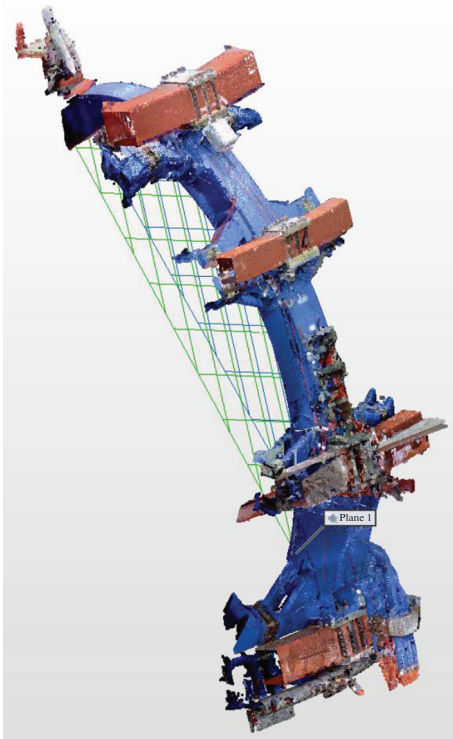


Рис. 7. Аппроксимация геометрии боковых поверхностей катушек тороидального поля плоскостями.

только после оценки погрешности произведенных измерений и обработки данных.

Источники погрешности сканирования классифицируются в соответствии с принципами ГОСТ Р 8.563-2009 [22]:

1. погрешность проведения геодезических измерений $\Delta_{г.и.}$, включающая погрешности методики и средств измерений;
2. погрешность сшивки отдельных кадров $\Delta_{сш.}$, полученных из различных положений сканера;
3. субъективные погрешности $\Delta_{суб.}$, вносимые оператором при снятии показаний и обработке результатов (погрешность аппроксимации поверхности и т.д.).

Закон распределения методической и инструментальной погрешности — нормальный, субъективной погрешности — равномерный. Тогда суммарная погрешность в случае равномерного распределения определяется по формуле [23]:

$$\Delta_{\Sigma} = \pm k \sqrt{\Delta_{г.и.}^2 + \Delta_{сш.}^2 + \Delta_{суб.}^2}, \quad (1)$$

где Δ_{Σ} — суммарная погрешность, k — коэффициент равномерного распределения, $k = 1.1$.

Погрешность проведения геодезических измерений

Погрешность проведения геодезических измерений включает в себя погрешность используе-

мого лазерного сканера Zoller + Frohlich GmbH IMAGER 5016 (Госреестр № 73136-18), погрешность определения координат съемочной и опорных сетей с учетом количества измерений в серии, максимального измеренного расстояния в зале установки (не более 35 м) и точности используемого электронного тахеометра Leica TM50 (Госреестр № 56482-14).

Для обеспечения требуемой точности измерений проводилось создание опорной и съемочной плановой и высотной сетей по результатам определения относительного расположения опорных отражателей [15].

Согласно [23] и выбранной методике проведения геодезических измерений погрешность получения массива точек находится по формуле

$$\Delta_{г.и.} = \sqrt{\Delta_{о.с.}^2 + \Delta_{с.с.}^2 + \Delta_{ск.}^2}, \quad (2)$$

где $\Delta_{о.с.}$ — погрешность определения координат опорной сети; $\Delta_{с.с.}$ — погрешность определения координат съемочной сети; $\Delta_{ск.}$ — погрешность лазерного сканера.

В соответствии с [16] были получены величины погрешностей:

$$\Delta_{о.с.} = 0.65 \text{ мм}; \quad \Delta_{с.с.} = 1.30 \text{ мм}.$$

Погрешность измерений с помощью лазерного сканера с учетом линейных и угловых отклонений измерительного луча:

$$\Delta_{ск.} = 2.6 \text{ мм}.$$

Суммарная погрешность проведения геодезических измерений составляет:

$$\Delta_{г.и.} = 2.98 \text{ мм}.$$

Погрешность сшивки отдельных кадров

Полученные снимки необходимо было объединить в единый массив точек, т.н. сшивка. 5. Создание цветной трехмерной точечной модели объекта, построенной по результатам лазерного сканирования, выполнялось при помощи программы Z + F LaserControl®. Из точностных характеристик метода сшивки, используемого в ПО, получаем:

$$\Delta_{сш.} = 3 \text{ мм}.$$

СУБЪЕКТИВНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ И ПОГРЕШНОСТИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для различных конструктивных элементов токамака данные извлекались в двух различных программных пакетах — Autodesk ReCap и PolyWorks (см. раздел 3).

При работе в данных программах над моделью возникают следующие источники погрешности:

- снятие показаний со сканов или погрешность оператора $\Delta_{опер.}$;

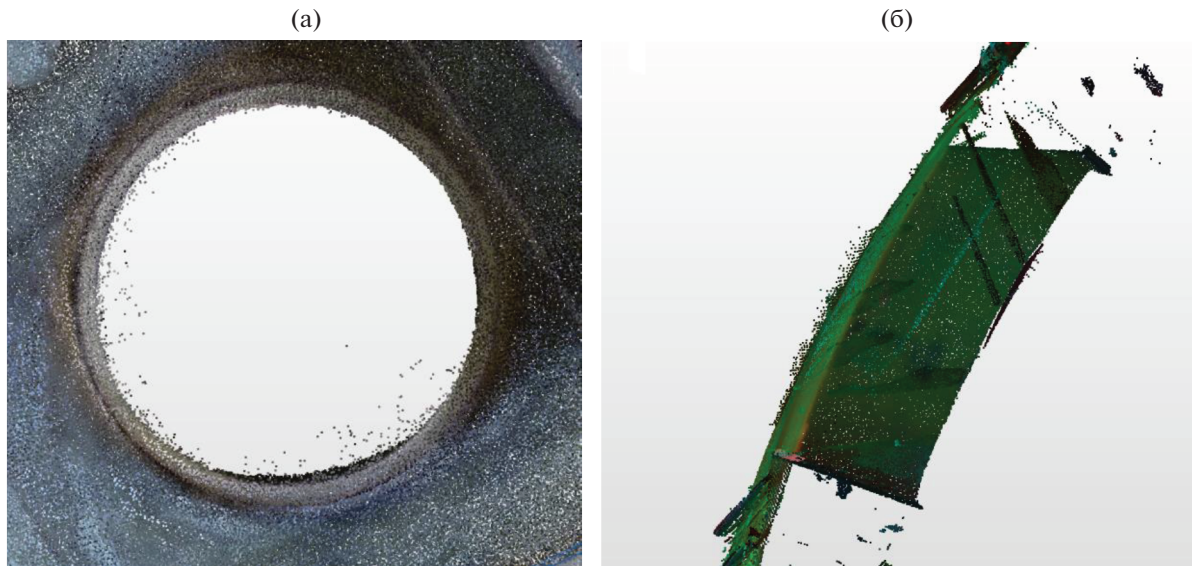


Рис. 8. Иллюстрация выбивающихся точек дискретной модели на примере: (а) фланца вакуумной камеры; (б) фрагмента катушки полоидального поля.

- аппроксимация поверхностей $\Delta_{\text{аппр}}$;
- построение оси токамака по геометрии аппроксимированных поверхностей $\Delta_{\text{ось}}$.

Ошибка оператора определяется его попаданием в нужный пиксель при ручном нанесении точек на рассматриваемые внутренние элементы камеры. При условии, что на 1 мм приходится приблизительно 20 точек массива, то есть 1 точка = $df = 50$ мкм, а человек в зависимости от своего самочувствия может ошибиться на $n = 3-6$ точек, то максимальная погрешность выставления точки:

$$\Delta_{\text{опер}} = ndf = 300 \text{ мкм} = 0.30 \text{ мм.} \quad (3)$$

В дискретной модели результирующие точки можно разделить на два типа: сгруппированные точки, образующие поверхности геометрических элементов токамака, и выбивающиеся точки, которые считаются шумом (см. рис. 8). Шумовые точки находятся на некотором расстоянии от поверхности геометрического элемента. Перед аппроксимацией поверхностей геометрических элементов оператор удаляет выбивающиеся точки, на точность аппроксимации эти точки не влияют. Сгруппированные точки формируют область конечной ширины, в которой находится действительная поверхность геометрического элемента. Ширина этой области не превышает 4 мм, следовательно погрешность обработки данных при аппроксимации не превышает половины этого значения:

$$\Delta_{\text{аппр}} = 2 \text{ мм.}$$

Для определения расположения узлов установки относительно друг друга была построена ось токамака по полученным поверхностям катушек полоидального поля (см. раздел 2). Так как

ось была рассчитана при обработке данных, необходимо учесть в суммарной погрешности влияние оператора. Так как методика совмещения моделей конструктивных элементов отличается в радиальном, вертикальном и тороидальном направлении различается, соответствующие погрешности также принимают различные значения. С учетом дисперсии координат центров погрешность в радиальном направлении составляет:

$$\Delta_{\text{ось}} = 12.6 \text{ мм.}$$

Суммарная субъективная погрешность в радиальном направлении принимает значения:

$$\Delta_{\text{суб RC}} = \pm 1.1 \sqrt{\Delta_{\text{опер}}^2 + \Delta_{\text{ось}}^2} = 13.9 \text{ мм,} \quad (4)$$

$$\Delta_{\text{суб PW}} = \pm 1.1 \sqrt{\Delta_{\text{аппр}}^2 + \Delta_{\text{ось}}^2} = 14.03 \text{ мм.} \quad (5)$$

В вертикальном и тороидальном направлении субъективная погрешность составляет:

$$\Delta_{\text{суб RC}} = \Delta_{\text{опер}} = 0.3 \text{ мм,} \quad (6)$$

$$\Delta_{\text{суб PW}} = \Delta_{\text{аппр}} = 2.0 \text{ мм.} \quad (7)$$

Суммарная погрешность, определяемая по формуле $\Delta_{\Sigma} = \pm k \sqrt{\Delta_{\text{г.и.}}^2 + \Delta_{\text{сш}}^2 + \Delta_{\text{суб}}^2}$ (2) имеет значения:

Используемый программный пакет	Значение погрешности Δ_{Σ} в направлении	
	вертикальном и тороидальном	радиальном
<i>Autodesk ReCap</i>	4.66 мм	15.98 мм
<i>PolyWorks</i>	5.15 мм	16.12 мм

Таблица 2. Результаты измерения катушек полоидального поля в вертикальном направлении

Номер катушки	Толщина катушки в 3D-модели, мм	Толщина катушки по данным лазерного геодезического сканирования, мм ($\Delta = \pm 10$ мм)	Толщина катушки, измеренная штангенциркулем, мм ($\Delta = \pm 0.5$ мм)
PF1	—	—	268
PF2	277	280.4	281
PF3	210	208.1	211
PF4	277	274.5	282
PF5	277	276.2	280
Номера катушек	Расстояния между катушками в САПР-модели, мм	Расстояния между катушками по данным лазерного геодезического сканирования, мм ($\Delta = \pm 10$ мм)	Расстояния между катушками, измеренные дальномером, мм ($\Delta = \pm 3$ мм)
PF1-PF2	—	—	—71
PF2-PF3	901.5	894.4	903
PF3-PF4	1551.5	1561.0	1559
PF4-PF5	1165	1171.7	1162

5. ВЕРИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТРЕХМЕРНОЙ САПР-МОДЕЛИ

После совмещения систем координат исходной САПР-модели Т-15МД и дискретной модели, а также построенной на ее основе верификационной САПР-модели, верификационная модель наполнялась объектами, построенными по данным дискретной модели. Данные о толщинах катушек полоидального поля и расстояниях между ними в САПР-модели и в дискретной модели представлены в табл. 2. Данные из дискретной модели получены для катушек PF2-PF5, так как катушки PF1 и PF6 не отсканированы. Катушки PF1 и PF6 перекрыты другими конструктивными элементами.

Для валидации измерений по данным верификационной модели были проведены измерения толщин катушек полоидального поля штангенциркулем и расстояний между катушками с помощью дальномера. Толщина катушек и расстояние между ними совпадает с проектными значениями в пределах точности измерений для всех способов измерения.

В табл. 3 приведены данные о верифицированных элементах модели: количество объектов одного типа, данные о которых были получены из верификационной модели, и количество снимаемых для каждого объекта точек. Количество снимаемых точек определялось формой геометрического элемента. Объекты сложной формы (катушки тороидального поля и перемычки витков пассивной стабилизации) требовали большего количества точек для их точного описания. Кроме указанных ранее объектов, были также измерены координаты магнитных зондов (датчиков формы) и плос-

костей экваториальных фланцев. Элементы верификационной модели представлены на рис. 9.

После переноса части элементов в трехмерную САПР-модель и совмещения ее с моделью комплекса токамака Т-15МД проводился анализ отклонений от действительной геометрии. Средние величины полученных отклонений в координатах Z-R (вертикаль–большой радиус токамака), а также отклонений в тороидальном направлении $\Theta_{\text{тор}}$ представлены в табл. 4.

Прочерк обозначает, что отклонение по данной координате не снималось.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для токамака Т-15МД впервые применен метод верификации трехмерной САПР-модели с использованием данных лазерного геодезического сканирования. Было проведено совмещение проектной САПР-модели Т-15МД и его верификационной модели на основе геометрии магнитной системы токамака. Точность верификационной модели после совмещения составила ~5 мм в вертикальном и тороидальном направлениях и ~16 мм в радиальном. Показано, что в пределах точности метода измерений магнитная система Т-15МД соответствует проектным данным. Также была проведена верификация объектов вакуумной камеры Т-15МД.

Результаты проведенной верификации дают возможность вводить поправки к данным трехмерной модели на реальное положение элементов токамака в пространстве при дальнейшем проектировании узлов комплекса токамака Т-15МД, а также при проведении расчетов равновесия и устойчивости плазмы.

Таблица 3. Элементы верификационной модели

Элемент	Количество элементов	Число снимаемых точек(плоскостей) с одного объекта
Датчики напряжения обхода	32	8 (с равным шагом по тороидальному углу)
Датчики формы (магнитные зонды)	39	1
Витки пассивной стабилизации	4	20 (с равным шагом по тороидальному углу, по 10 точек на верхней и нижней гранях)
Перемычки витков пассивной стабилизации	2	30
Катушки тороидального магнитного поля	16	2 (плоскости)
Катушки полоидального магнитного поля	5	4 (2 плоскости + 2 цилиндра)
Отверстия под крепление дивертора	736	2
Ребра жесткости внутреннего обвода	46	8 (плоскостей)
Экваториальные фланцы токамака	16	1 (плоскость)
Инжекторы нейтральных атомов	3	10
«Дно» и «потолок» вакуумной камеры	2	1 (плоскость)

Таблица 4. Отклонения элементов САПР-модели Т-15МД от реальной геометрии

Элемент модели	ΔZ , мм	ΔR , мм	$\Theta_{\text{тор}}$, мм
Вертикальные габариты вакуумной камеры	24	—	—
Ребра жесткости внутреннего обвода	—	—	6
Отверстия под крепление дивертора	8	9	—
Экваториальные фланцы токамака	—	45	—
Витки пассивной стабилизации	30	27	—

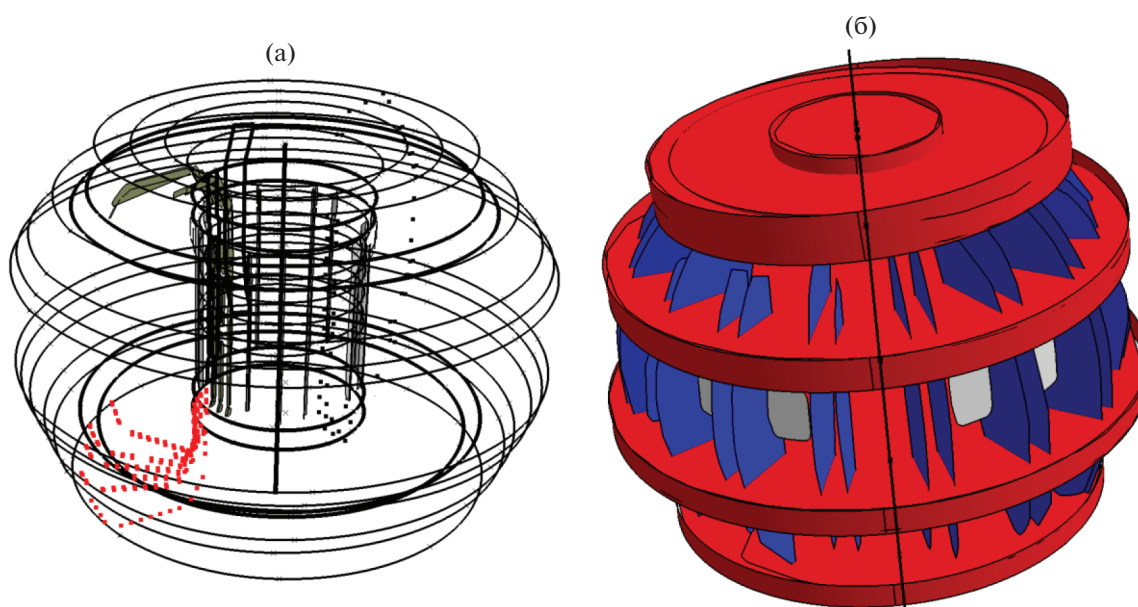


Рис. 9. Верификационная модель: (а) внутри-вакуумные элементы Т-15МД: датчики напряжения обхода, витки пассивной стабилизации, магнитные зонды, ребра жесткости вакуумной камеры и крепежные отверстия на них; (б) магнитная система (красный и синий цвета) и экваториальные фланцы (серый цвет) Т-15МД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Хвостенко и др.* // ВАНТ. Сер.: Термоядерный синтез, 2019. Т. 42 (1). С. 15.
<https://doi.org/10.21517/0202-3822-2019-42-1-15-38>
2. *Melnikov A.V. et al.* // Fusion Eng. Des. 2015. V. 96–97. P. 306.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.06.080>
3. *Драбинский М.А. и др.* // Сборник тезисов докладов XLIX Международной звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. С. 68.
4. *Melnikov A.V. et al.* // Nucl. Fusion. 2017. V. 57 (7). P. 072004.
5. *Melnikov A.V. et al.* // Fusion Eng. Des. 2019. V. 146. P. 850.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.01.096>
6. *Мельников А.В. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2022. Т. 115 (6). С. 360.
<https://doi.org/10.31857/S1234567822060040>
7. *Krupin V. et al.* // J. Instrum. 2020. V.15 (2). P. C02027.
8. *Roy I.N. et al.* // EPJ Web Conf. 2017. V. 149. P. 03021.
<https://doi.org/10.1051/epjconf/201714903021>
9. *Сычугов Д.Ю. и др.* // Comput. Nanotechnol. 2017. No. 2. P. 24.
10. *Горбун М.С. и др.* // ВАНТ. Сер.: Термоядерный синтез, 2019. Т. 42 (4). С. 45.
11. Leica Geosystems AG – Part of Hexagon. <https://leica-geosystems.com/products/total-stations/robotic-total-stations/leica-nova-tm50>.
12. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений, номер записи 369192.
<https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/369192>.
13. Zoller + Fröhlich GmbH. <https://www.zofre.de/laser-scanner/3d-laserscanner/z-f-imager-5016>.
14. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений, номер записи 530258. <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/530258>.
15. СП 126.13330.2017. Геодезические работы в строительстве.
16. ГКИНП-02-033-82. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1 : 2000, 1 : 1000 и 1 : 500.
17. Компания “Кредо-Диалог”. <https://credo-dialogue.ru/produkty/korobochnye-produkty/239-credo-dat-professional-naznachenie.html>.
18. Реестр российского программного обеспечения. https://reestr.digital.gov.ru/reestr/306513/?sphrase_id=827123.
19. Zoller + Fröhlich GmbH. <https://www.zofre.de/en/laser-scanners/laserscanning-software/z-f-lasercontrolr>.
20. ReCap Pro [2024] Features – Autodesk // AUTODESK US. <https://www.autodesk.com/products/recap/features>.
21. PolyWorks – The Smart 3D Metrology Digital Ecosystem // Innovmetric. <https://www.innovmetric.com/products/products-overview>.
22. ГОСТ Р 8.563–2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений.
23. ГОСТ Р 8.736–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.

Verification of the 3D CAD-Model of T-15MD Tokamak

I. A. Shelegeda^{1, 2, *}, M. A. Drabinskiy¹, M. V. Talalay^{1, 2}, and I. A. Nazarov³¹National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia³JSC “GSPI”, Moscow, 115088 Russia

*e-mail: shelegeda01@student.bmstu.ru

Received April 28, 2023; revised July 4, 2023; accepted July 10, 2023

Abstract—To design the complex of diagnostics and technical systems of the T-15MD tokamak, a three-dimensional CAD-model is used, which includes all structural elements of the tokamak and surrounding heating and diagnostic systems, technical systems such as vacuum pumping and data acquisition systems, etc. Using of the CAD-model allows to take into account relative location of adjacent systems and the tokamak geometry and integrate newly designed systems. This approach is applied to the design of ITER and used for the first time for Russian tokamaks. In order to provide the most comprehensive matching of the CAD-model to the real T-15MD it is necessary to perform verification of the CAD model. This paper presents a method of the verification of the CAD-model of T-15MD tokamak complex based on the data of the laser geodesic scanning and the results of assessing the accuracy of the performed work.

Keywords: CAD-model, verification, metrology, T-15MD tokamak