

## ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 621.039.6

### ВАКУУМНАЯ КАМЕРА ТОКАМАКА МИФИСТ-1

© 2020 г. Г. М. Воробьев<sup>а</sup>, С. А. Крат<sup>а, \*</sup>, В. Д. Миронов<sup>а</sup>, В. А. Курнаев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Каширское ш. 31, Москва, 115409 Россия

\*E-mail: stepan.krat@gmail.com

Поступила в редакцию 01.08.2020 г.

После доработки 03.08.2020 г.

Принята к публикации 05.08.2020 г.

Одним из важнейших конструктивных элементов токамака является вакуумная разрядная камера, к которой предъявляются специфические требования, связанные с индукционным способом генерации плазмы и, соответственно, наличием переменных магнитных полей, дополнительно воздействующих на камеру. Кроме того, камера не только должна обеспечить возможность создания и удержания в ней токовой плазмы, но предоставлять возможности диагностики ее параметров через соответствующие патрубки. Создаваемый в МИФИ малый сферический токамак, предназначенный как для учебных, так и для исследовательских целей, имеет обширную программу таких исследований, поэтому разрядная камера должна позволять не только быстро создавать вакуум, выдерживать переменные магнитные поля, но и быть удобной для измерения ее параметров с помощью различных диагностик, а также позволять быстро осуществлять замену внутренних элементов и ввод в камеру дополнительной мощности. В данной работе описана удовлетворяющая этим требованиям конструкция вакуумной камеры токамака МИФИСТ-1 и приведены расчеты в обосновании выбора материала, толщины характерных элементов камеры, а также приведены результаты испытаний готовой камеры

*Ключевые слова:* токамак, разрядная камера, механическая устойчивость

DOI: 10.1134/S2079562920040181

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

В НИЯУ МИФИ создается малый сферический учебно-демонстрационный токамак МИФИСТ, основные параметры которого приведены в [1, 2]. В ряду компактных и сферических токамаков, которые удобны для применения в учебных целях [3–7], сферические [4–6] имеют то преимущество, что при сравнимых размерах (а значит и стоимости изготовления) позволяют получать более высокие параметры плазмы: значение тока плазмы и отношение давления плазмы к давлению магнитного поля за счет более высокие значений вытянутости по вертикали и значения треугольности. Поэтому сферические токамаки продолжают активно создаваться [8–12].

На вакуумную камеру токамака действует как атмосферное давление, так и электромагнитные силы, вызванные протекающим по ней токами при работе электромагнитной системы. Для малого токамака с относительно короткой длительностью разряда влияние конструкции камеры на его работоспособность и операционные пределы весьма существенно. Если металлическая камера не имеет изоляционного разъема по большому обходу, то при индукционном возбуждении плаз-

менного тока по ней протекает ток, который в первые моменты может во много раз превышать плазменный ток. При этом возникает временная задержка максимального напряжения на обходе и уменьшения его амплитуды внутри камеры. Для обеспечения пробоя требуется компенсация магнитного поля от этого тока внутри камеры на уровне нескольких эрстед. При быстром изменении тороидального поля, возникающий по малому обходу камеры ток может вызвать сжимающее давление намного превосходящее атмосферное. Очень опасные последствия может вызвать ток по камере при срыве плазменного тока. Следует также учитывать, что при прогреве вакуумной камеры разные ее участки смещаются относительно своего начального положения. Это отражается на способах подсоединения внешней аппаратуры к патрубкам. Все эти факторы надо учитывать при конструировании вакуумной камеры [13], поэтому ее создание требует тщательного обоснования.

В данной статье описывается расчет камеры токамака МИФИСТ-1 на устойчивость и результаты испытаний изготовленной камеры.

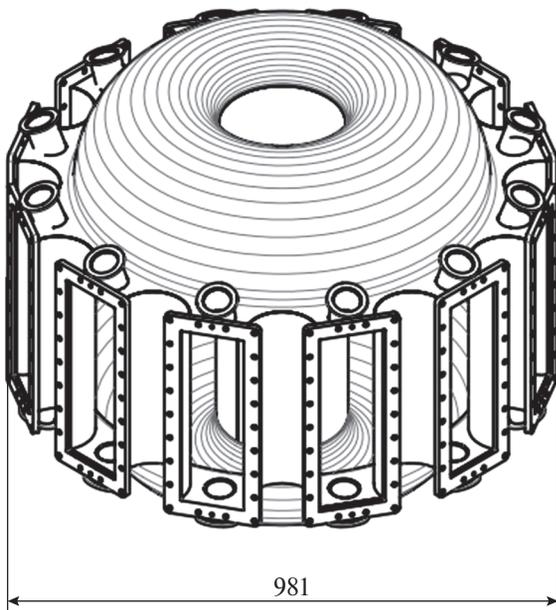


Рис. 1. Конструкция вакуумной камеры токамака МИФИСТ-1.

## 2. МЕХАНИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ

Конструкция при ее механическом нагружении может разрушиться, когда в каком-либо ее элементе превышен предел прочности материала, либо при потере изделием устойчивости. Расчеты и практика показывают, что в случае вакуумной камеры запас прочности намного превышает запас устойчивости. Поэтому, при конструировании устойчивости уделяется основное внимание. Из механических свойств материала при расчете на устойчивость учитывается только модуль Юнга. В отличие, например, от предела прочности, он примерно одинаков почти для всех сталей. Поэтому материал камеры можно подбирать по другим критериям. На устойчивость камеры влияет конструкция всех ее элементов. Но даже при наличии неудачных, с точки зрения устойчивости, элементов конструкции задачу устойчивости можно решить увеличением толщины стенок вакуумной камеры. Зависимость предела устойчивости от толщины стенок очень сильная (в большинстве элементов кубическая). Но увеличение толщины стенок влечет за собой увеличение токов по камере и соответственно увеличение действующих на нее электродинамических сил, увеличение времени проникновения внешних управляющих магнитных полей и увеличению паразитных магнитных полей внутри вакуумной камеры. Поэтому желательно иметь минимальную толщину камеры, обеспечивающую ее устойчивость с необходимым запасом. При выборе материала вакуумной камеры учитывается также химический состав стали,

газоотделение, взаимодействие с водородом, распыление при бомбардировке плазменными частицами, магнитные свойства, удельная электропроводность, механические характеристики, свойства сварных швов. Кроме конструкторской разработки надо также учитывать и технологические возможности изготовления в конкретных условиях.

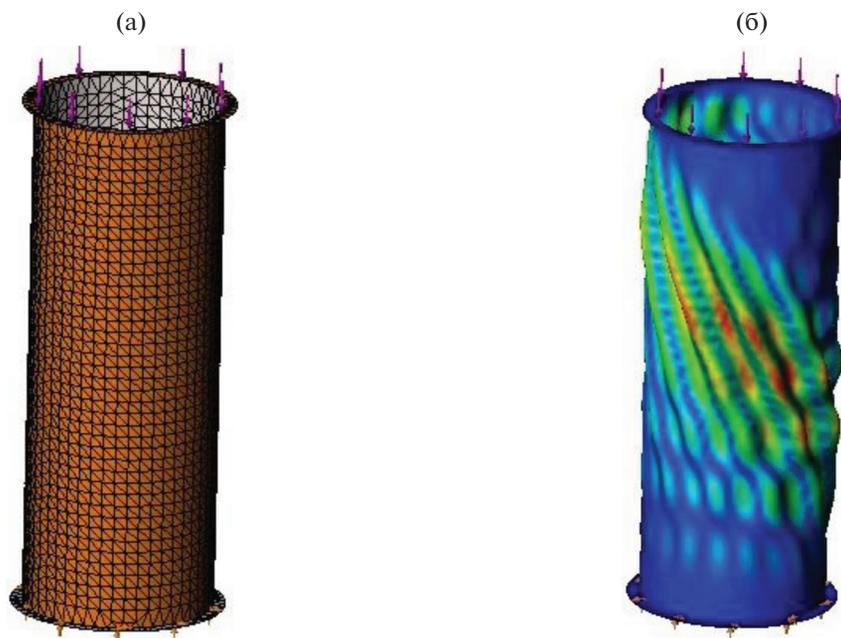
Особенности предложенной конструкции вакуумной камеры токамака МИФИСТ-1 кратко описаны в [1]. В качестве материала камеры выбрана сталь AISI 316. Камера состоит из внутреннего цилиндра, верхнего и нижнего купола и центрального пояса с патрубками (рис. 1). Купола имеют безмоментную форму оптимальную для устойчивости. Они изготавливались из цельного листа стали методом выдавливания. Центральный пояс изготовлен из двенадцати цилиндрических элементов. Сверху и снизу пространство между цилиндрами закрыто плоскими крышками (в дальнейшем называемыми шайбами), на которых находятся 24 наклонных патрубка. Внешний участок этой конструкции образует 12 больших прямоугольных патрубков.

Предварительные расчеты показывают, что если при работе токамака не используется адиабатическое сжатие плазмы и исключены срывы плазменного тока, то основным фактором, влияющим на устойчивость вакуумной камеры, является атмосферное давление. Были произведены расчеты на устойчивость как отдельных элементов камеры, так и ее целиком с варьированием некоторых параметров.

Из теории устойчивости тонкостенных оболочек известно, что на их устойчивость существенно влияет отклонение реального профиля оболочки от идеального теоретического. Обычно, полученные при испытаниях значения критической нагрузки меньше, чем теоретические. В результате проведения многочисленных экспериментов с оболочками различной конфигурации получены формулы для практического расчета (см. [14]). При этом выявлено, что при осевом сжатии реальная критическая нагрузка в 2–3 раза меньше теоретической, а при действии только бокового давления снижение реальной критической нагрузки происходит в 1.25–1.4 раза. Учитывая, что расчеты устойчивости в различных программах выполняются по теоретическим формулам для идеальных моделей, для определения реального значения критической нагрузки в получаемые результаты необходимо вносить поправки.

### 2.1. Устойчивость внутреннего цилиндра камеры от действия внешнего атмосферного давления

Внутренний цилиндр камеры токамака имеет диаметр 24.0 см и высоту 64.8 см. Он подвергается



**Рис. 2.** Модель внутреннего цилиндра высотой 648 мм, диаметром 240 мм и толщиной стенки 0.5 мм вакуумной камеры токамака с граничными условиями и расчетной сеткой (а), и результаты расчета относительных деформаций методом конечных элементов (б), иллюстрирующие потерю устойчивости цилиндра.

осевому сжатию и внутреннему давлению. В первом приближении, считая камеру тором, осевая сжимающая нагрузка на цилиндр будет определяться, как произведение атмосферного давления  $p = 1 \text{ кгс/см}^2$  на площадь кольца с внутренним радиусом, равным радиусу цилиндра, и наружным радиусом, равным радиусу наивысшей точки купола камеры. В нашем случае это радиусы 120 и 205 мм соответственно. Сила осевого сжатия камеры:

$$F_{сж} = p\pi(R^2 - r^2) = 870 \text{ кгс} = 8700 \text{ Н.} \quad (1)$$

Критическую силу сжатия для цилиндра определяется по формулам для практического расчета, представленным в работе [14]:

$$F_{кр} = 2\pi k E \delta^2, \quad (2)$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от отношения радиуса к толщине обечайки,  $E = 19300 \text{ кгс/мм}^2$  — модуль упругости нержавеющей стали,  $\delta$  — толщина обечайки, мм.

Для толщины цилиндра при  $R = 120 \text{ мм}$ ,  $\delta = 0.5 \text{ мм}$ :  $R/\delta = 120/0.5 = 240$ , что согласно [14] дает значение  $k = 0.23$ . Тогда из (1) получим  $F_{кр} = 6970 \text{ кгс}$ , напряжения при этом составят  $\sigma_{кр} = 6970/(3.14 \times 240 \times 0.5) = 18.5 \text{ кгс/мм}^2$ , что меньше предела текучести этой стали  $24 \text{ кгс/мм}^2$ .

Для толщины цилиндра  $1 \text{ мм}$   $R/\delta = 120$ , что, в соответствии с [14], дает значение  $k = 0.3$  и  $F_{кр} = 36361 \text{ кгс}$ . Напряжения составят  $\sigma_{кр} = 48.2 \text{ кгс/мм}^2$ ,

что вдвое больше предела текучести, т.е. цилиндр сломается до потери устойчивости. Таким образом, при толщине цилиндра  $1 \text{ мм}$  критическая сила сжатия больше в 5 раз, чем при толщине  $0.5 \text{ мм}$ .

Запас по устойчивости для внутреннего цилиндра при толщине  $0.5 \text{ мм}$  составит  $n_{уст} = 69700/8700 = 8$ , что больше, чем требуемое для обечаек значение  $n = 2.4$ .

Помимо аналитических расчетов, проводилось численное моделирование с использованием средств программного пакета SOLIDWORKS Simulation методом конечных элементов (МКЭ). На рис. 2а, 2б, представлены сетка модели и результат расчета для толщины  $0.5 \text{ мм}$ , аналогичные расчеты были сделаны и для толщины  $1 \text{ мм}$ . Качественно картина потери устойчивости похожа.

Принимая средний коэффициент снижения теоретического значения критической силы (смотри выше) до реального его значения равным  $2.0$ , получим для толщины  $0.5 \text{ мм}$   $F_{кр} = 172400/2.0 = 86200 \text{ Н}$ , что близко к значению  $F_{кр} = 69700 \text{ Н}$ , определенному по [14]. Для толщины  $1 \text{ мм}$  имеем  $F_{кр} = 713400/2.0 = 356700 \text{ Н}$ , что близко к значению  $363610 \text{ Н}$ , определенному по [14]. Таким образом, расчет по эмпирическим формулам и методом конечных элементов с учетом необходимой коррекции дают примерно один и тот же результат.

Поскольку внутренний цилиндр кроме осевого сжатия подвергается воздействию внутреннего атмосферного давления, то в расчетах устойчивости

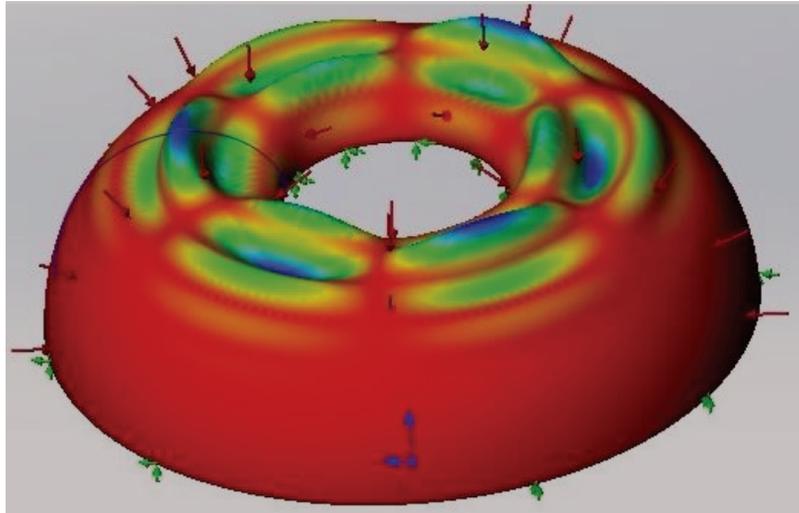


Рис. 3. Потеря устойчивости купола толщиной 1.5 мм от внешнего давления.

следует, в принципе, учесть и его составляющую. Но значение внутреннего давления равно  $1 \text{ кг/см}^2$  для данных размеров диаметра и толщины так мало, что согласно оценкам в соответствии с [14] практически не влияет на результат расчета. Таким образом, по устойчивости и прочности для камеры токамака при воздействии наружного атмосферного давления достаточно использовать внутренний цилиндр с толщиной 0.5 мм. При этом напряжения сжатия составит:  $\sigma_{сж} = 2.3 \text{ кгс/мм}^2$ , то есть на порядок меньше предела текучести  $24 \text{ кгс/мм}^2$ , а запас по устойчивости составит  $n_{уст} = 8$ , что больше значения  $n = 2.4$  требуемого для обечаек.

### 2.2. Устойчивость купола камеры от действия наружного атмосферного давления

Поскольку геометрия купола не является геометрией круглого тора, то применять аналитические формулы для расчета потери устойчивости некорректно. Оценить критическое наружное давление для купола возможно численно по МКЭ. На рис. 3 представлены результаты расчета от действия наружного давления на купол с толщиной стенок 1.5 мм с шарнирно закрепленными кромками. Критическое давление составляет 32 атм. Расчеты для толщины 1 мм дают значение критического давления в 13 атм.

Полученные при помощи численного моделирования значения критического давления для купола являются завышенными. Во-первых, эти значения для идеальной оболочки и, следовательно, для реальной оболочки их надо уменьшить в 2 раза. Во-вторых, шарнирное крепление по кромкам дает завышенную оценку критического давления, так как купол на самом деле опирается на

подвижные детали, которые сами деформируются от воздействия атмосферного давления. Ориентировочно, надо еще в 1.5 раза уменьшить значения критического давления.

### 2.3. Устойчивость камеры

После расчета устойчивости отдельных элементов камеры был проведен расчет ее устойчивости как целого.

На рис. 4 представлены сетка модели и результат расчета по МКЭ. В качестве закрепления модели принято шарнирное отпирание по нижней кромке внутреннего цилиндра. Нагрузкой для камеры является всестороннее наружное давление.

Толщины элементов камеры были приняты следующие: 0.5 мм – для внутреннего цилиндра, 1.5 мм – для куполов, нижней и верхней шайбы, для всех наружных цилиндров, 8 мм – для плоских фланцев. Внешний диаметр модельной камеры составляет 981 мм. Высота цилиндрической части 378 мм.

Критическое давление для идеальной (имеющей точный теоретический контур) камеры составляет 5 атм.

Для реальной камеры следует ожидать критическое давление 2.5–3.0 атм. На рис. 4б видно, что потеря устойчивости происходит в районе верхней и нижней шайбы. Следует рассмотреть варианты увеличения толщины шайбы или установку радиальных шпангоутов на шайбе с заходом на купол.

На рис. 5 и 6 показаны результаты моделирования при увеличении толщины купола до 2 мм и толщины шайбы до 2-х мм. На рис. 5 показана картина потери устойчивости камеры с шайбой толщиной 2 мм. Критическое давление для иде-

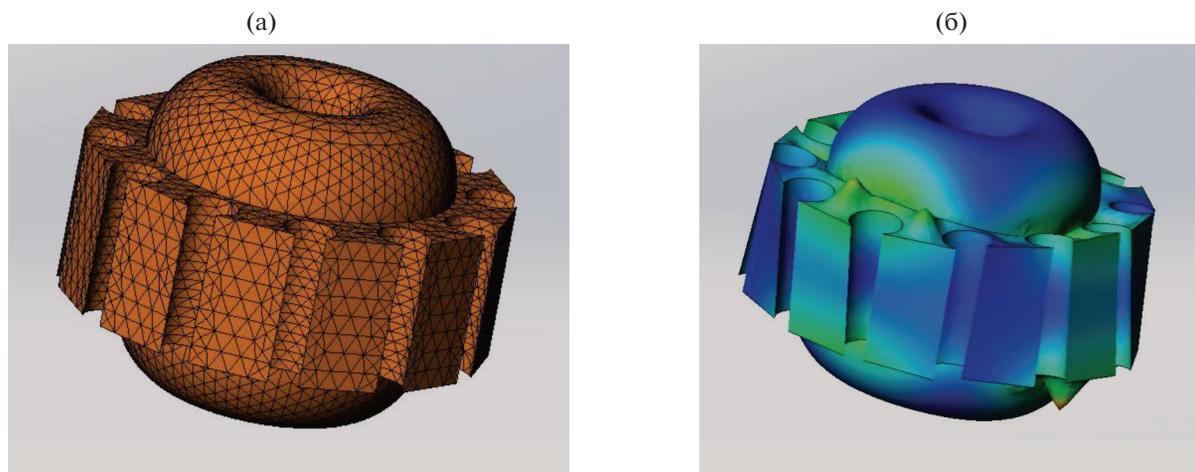


Рис. 4. Расчет по МКЭ потери устойчивости камеры: (а) сетка расчетной модели, (б) результат моделирования.

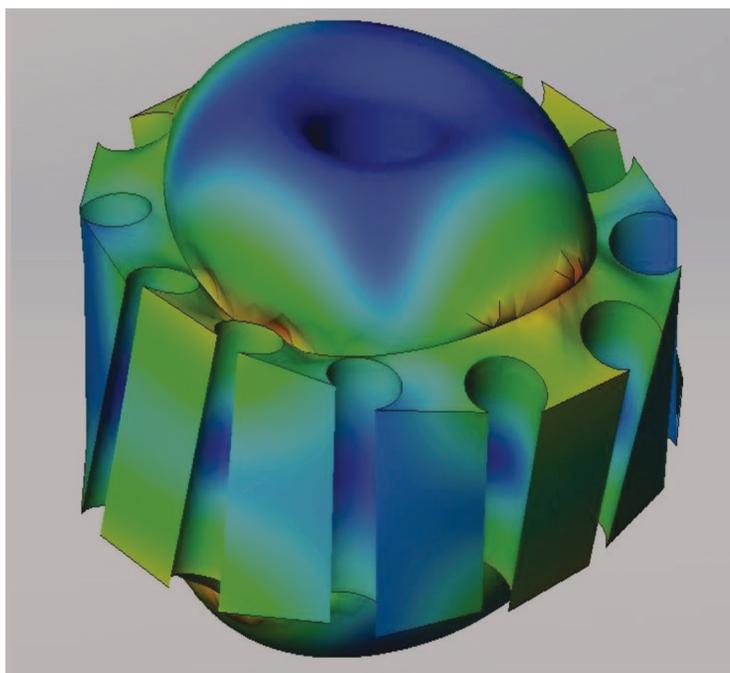


Рис. 5. Потеря устойчивости камеры с куполом 1.5 мм, шайбой толщиной 2 мм.

альной камеры составляет 7.5 атм, для реальной камеры  $7.5/2 \approx 3.8$  атм.

Геометрия потери устойчивости камеры с куполом 2 мм, шайбой толщиной 2 мм на шайбе показана на рис. 6. Критическое давление для идеальной камеры в данном случае составляет 9.3 атм, для реальной камеры  $9.3/2 = 4.6$  атм.

### 3.3. Изготовление вакуумной камеры и ее испытания

Вакуумная камера, соответствующая описанной выше конструкции, была изготовлена на

предприятии ФГУП ЭЗАН, купола произведены ООО «Моспресс». После производства и до сварки купола были подвергнуты электрохимической полировке. Внешний вид вакуумной камеры представлен на рис. 8. В процессе производства был выявлен ряд технических ограничений, потребовавших уточнений конструкции.

Купола камеры были произведены из листов стали AISI 321 (аналог 08X18H10T) начальной толщиной до прокатки 2.5 мм. Это было связано с меньшей пластичностью стали AISI 316 (аналог 03X17H14M3) и образованием разрывов в детали в процессе производства. Предполагалось произ-

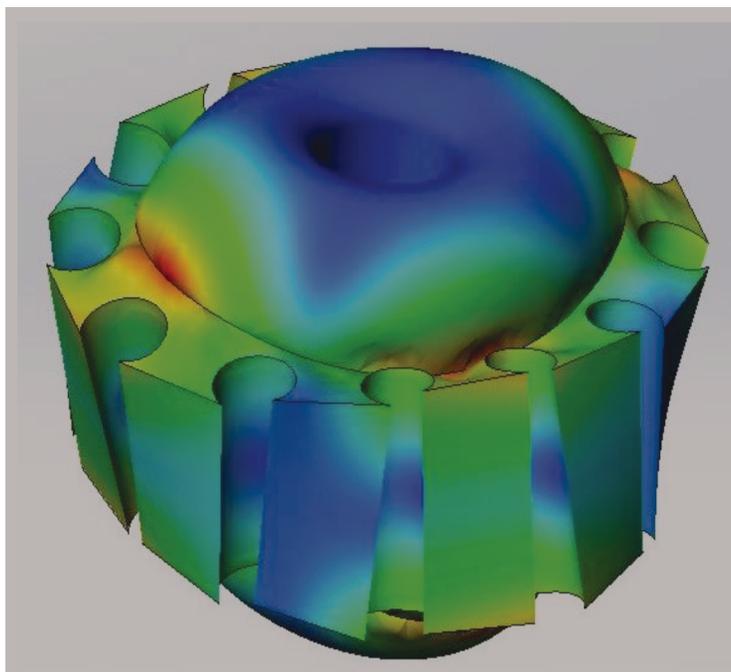
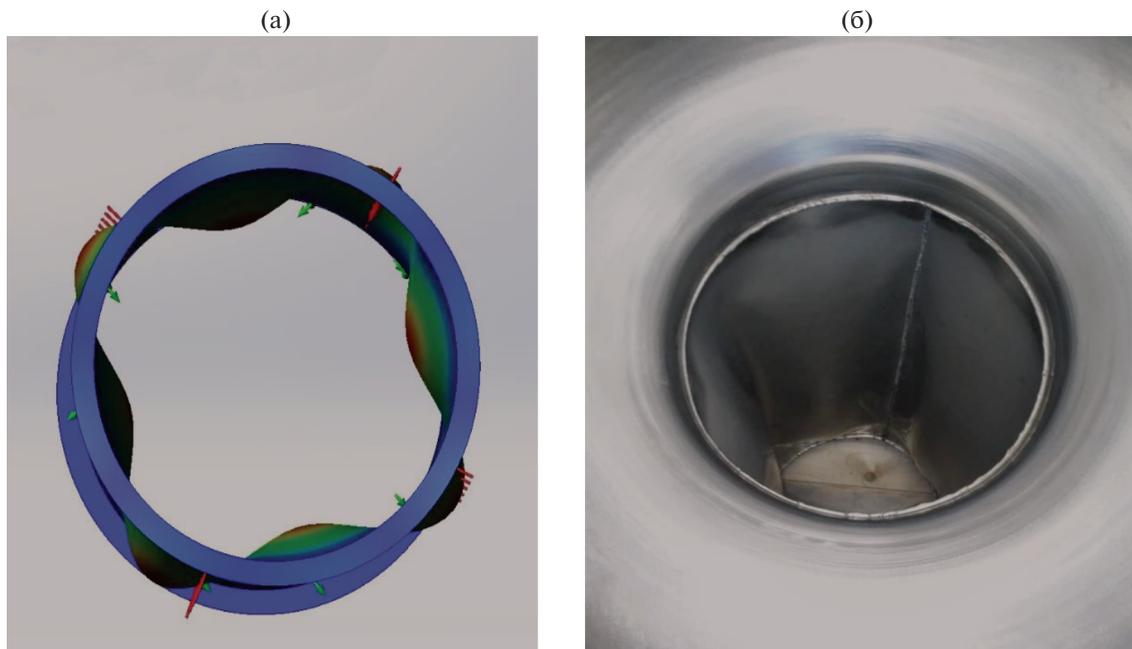


Рис. 6. Потеря устойчивости камеры с куполом 2 мм, шайбой толщиной 2 мм.



Рис. 7. Фотография вакуумной камеры токамака МИФИСТ-1.



**Рис. 8.** Механическая деформация внутреннего цилиндра токамака МИФИСТ-1 после создания внутри вакуумной камеры давления, избыточного по отношению к атмосферному: (а) результаты численного моделирования (1 атм избыточного давления); (б) результаты эксперимента (1.6 атм избыточного давления).

водство куполов и плоских крышек как единых деталей из цельного листа, однако в процессе производства было установлено, что производство плоской внешней крышки ротационной вытяжкой невозможно из-за образования неустойчивостей, разрывов. Как следствие плоские крышки были произведены отдельно из листа стали 2.5 мм и в стык сварены с куполами камеры.

Остальные элементы камеры были произведены из стали марки AISI 316. Толщина внутреннего цилиндра была установлена как 1 мм. Толщина внешних цилиндров была увеличена до 3 мм для облегчения сварки с прямоугольными фланцами.

Испытание на вакуум проводилось двумя методами: созданием избыточного давления в камере и классическим методом с помощью гелиевого течеискателя. При этом важно отметить, что внутренний цилиндр намного менее устойчив по отношению к противоположно направленным нагрузкам, возникающим при создании внутри тороидальной камеры давления, избыточного по отношению к атмосферному. Так, согласно численным расчетам, для внутреннего цилиндра толщиной 1 мм, создание избыточного давления величиной 1 атм, приведет к необратимым деформациям (рис. 8а). Данные результаты расчетов качественно подтвердились экспериментально при испытании камеры избыточным давлением рис. 8б), что хорошо соответствует результатам численных расчетов с помощью МКЭ, проведенных для этого случая.

#### 4. ВЫВОДЫ

Спроектирована, рассчитана и испытана вакуумная камера малого сферического токамака МИФИСТ-1. показано, что расчеты с использованием имеющегося пакет программ и полуэмпирических формул, примененных при расчете механической прочности камеры, хорошо согласуются друг с другом. При нормальном режиме работы (при внешнем давлении 1 атм. данная камера должна обладать не менее чем четырехкратным запасом по устойчивости.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Расчеты вакуумной камеры произведены в рамках работ по договору 313/1755-Д от 20.09.2019 между НИ-ЯУ МИФИ и АО “Наука и Инновации” ГК Росатом на НИОКР по теме “Разработка проекта и модернизация малого сферического токамака для подготовки высококвалифицированных специалистов по направлению “физика плазмы”.

Вакуумная камера произведена частично за счет средств добровольных пожертвований ООО “Пирамид Вакуум” и выпускника кафедры физики плазмы МИФИ Малафеева Олега Аркадьевича.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Курнаев В.А. и др. // Ядерная физика и инжиниринг. 2019. Т. 10. С. 24–27. <https://doi.org/10.1134/S2079562919010135> [Kurnaev V.A.

- et al.* // Phys. At. Nucl. 2019. V. 82. P. 1329–1331. <https://doi.org/10.1134/S1063778819100144>].
2. Курнаев В.А. и др. // Вестник НИЯУ МИФИ. 2019. Т. 8. № 6. 491–497.
  3. Svoboda V. *et al.* // Fusion Eng. Des. 2016. V. 112. P. 1038–1044.
  4. He Y.X. // Plasma Sci. Technol. 2002. V. 4. P. 1355.
  5. Shiraiwa S. *et al.* // Proc. 26th EPS Conf. Maastricht, 14–18 June, 1999. Plasma Phys. 1999. V. 23J. P. 441.
  6. Eidietis N.W. *et al.* // J. Fusion Energy. 2007. V. 26. P. 43.
  7. Varandas C. *et al.* // Fusion Technology. 1996. V. 29. P. 105.
  8. Gusev V.K. *et al.* // Nucl. Fusion. 2013. V. 53. P. 093013.
  9. Minaev V.B. *et al.* // Nucl. Fusio. 2017. V. 57. P. 066047.
  10. Harrison J.R. *et al.* // Nucl. Fusion. 2019. V. 59. P. 12011.
  11. Menard J.E. *et al.* // Nucl. Fusion. 2017. V. 57. P. 1.
  12. Gryaznevich M., Asunta O. // Fusion Eng. Des. 2017. V. 123. P. 177.
  13. Агеев Н.П., Дворкин Н.Я., Миков В.В. Сферические токамаки. Технологические основы проектирования и изготовления высокоресурсных тонкостенных металлических оболочек вакуумных камер. 2003. СПб.: Изд-во “Мифрил”.
  14. Лизин В.Т., Пяткин В.А. Проектирование тонкостенных конструкций. 2003. Москва: М.: Машиностроение, 2003.

## Vacuum Chamber of the MEPHIST-1 Tokamak

G. M. Vorobyov<sup>1</sup>, S. A. Krat<sup>1</sup>, \*, V. D. Mironov<sup>1</sup>, and V. A. Kurnaev<sup>1</sup>, †

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Kashirskoe sh. 31, Moscow, 115409 Russia

\*e-mail: [stepan.krat@gmail.com](mailto:stepan.krat@gmail.com)

Received August 1, 2020; revised August 3, 2020; accepted August 5, 2020

One of the most important design elements of a tokamak is a vacuum discharge chamber, which has specific requirements related to the induction method of plasma generation and, accordingly, the presence of variable magnetic fields that additionally affect the chamber. In addition, the chamber should not only provide the possibility of creating and retaining current plasma in it, but also provide the possibility of diagnosing its parameters through the appropriate pipes. The small spherical tokamak is under construction at MEPHI, intended for both educational and research purposes, has an extensive program of such research, so the discharge chamber must not only quickly create a vacuum, withstand variable magnetic fields, but also be convenient for measuring. This paper describes design, calculations of mechanical stability and results of manufactured chamber tests.

*Keywords:* tokamak, discharge chamber, mechanical stability

---

† Deceased.