

УДК 621.039.623

## АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ В ТЕХНОЛОГИИ НАЧАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ ТОКАМАКА К ПЛАЗМЕННОМУ ЭКСПЕРИМЕНТУ НА ПРИМЕРЕ ТСП И Т-11М

*В.А. Морозов<sup>1</sup>, А.Н. Щербак<sup>1</sup>, С.В. Мирнов<sup>1, 2</sup>*

<sup>1</sup>АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В работе анализируется известный в вакуумной технике метод «осушения» вакуумных объёмов путём их продувания «сухими» газами в применении к разрядным камерам токамаков на этапе их «черновой» подготовки перед плазменным экспериментом. Конкурентным ему является традиционный метод термодесорбции путём нагрева камеры токамака в условиях высоковакуумной откачки. На примере токамаков ТСП и Т-11М показано, что в начальной фазе процесса подготовки камеры токамака, перед переходом к использованию плазменных методов подготовки стенок, простой метод «осушения» и тем более с использованием принудительной конвекции «сухих» газов может иметь серьёзные преимущества перед традиционным способом.

**Ключевые слова:** токамак, плазма, вакуумная камера, вакуумный насос, криогенника, тлеющий разряд.

## ALTERNATIVE POSSIBILITY IN THE TECHNOLOGY OF INITIAL PREPARATION OF A TOKAMAK CHAMBER FOR A PLASMA EXPERIMENT ON THE EXAMPLE OF TSP AND T-11M

*V.A. Morozov<sup>1</sup>, A.N. Shcherbak<sup>1</sup>, S.V. Mirnov<sup>1, 2</sup>*

<sup>1</sup> JSC RF TRINITY, Moscow, Russia

<sup>2</sup> National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

The paper analyzes the well-known method of «drying» vacuum volumes by purging them with «dry» gases in application to tokamak discharge chambers at the stage of their «rough» preparation before the plasma experiment. The traditional method of thermal desorption by heating the tokamak chamber in high-vacuum pumping conditions is competitive to it. Using the example of TSP and T-11M tokamaks, it is shown that in the initial phase of the tokamak chamber preparation process, before switching to the use of plasma wall preparation methods, a simple method of «drying» and even more so with the use of forced convection of «dry» gases can have serious advantages over the traditional method.

**Key words:** tokamak, plasma, vacuum chamber, vacuum pump, cryogenics, glow discharge.

DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-3-5-10

### ВВЕДЕНИЕ

Достижение высоких плазменных характеристик в токамаках возможно лишь в условиях жёсткого соблюдения чистоты плазменного шнура, т.е. минимального уровня его загрязнения примесными атомами поверхностных плёнок, стенки и диафрагм [1]. В связи с этим после завершения технологических работ, потребовавших напуска атмосферы в разрядную камеру, необходимо проведение специальной процедуры очистки её внутренних стенок от последствий их загрязнения попавшими извне компонентами атмосферного воздуха — прежде всего от паров воды, двуокиси углерода и азота (в случае работы с литием). Задача отчасти облегчается, если до открытия камеры токамака на атмосферу её объём заполнить инертным газом (аргоном либо гелием) до величины атмосферного давления. Это снижает последствия разгерметизации, но активным компонентам воздуха, как правило, удаётся частично проникнуть внутрь разрядной камеры либо в процессе разгерметизации, либо через неплотность временных заглушек, что неминуемо приводит к заметному росту всех тех же примесей —  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$  и соответственно к необходимости специальной очистки стенок вакуумной камеры.

Обычно цикл подготовки камеры состоит из двух этапов: первый — термодесорбция воды со стенок путём «чернового» прогрева на протяжении двух—трёх недель с постепенным подъёмом температуры стенок от 50—100 до 200—250 °C в рамках технически допустимой скорости откачки камеры турбомолекулярными насосами.

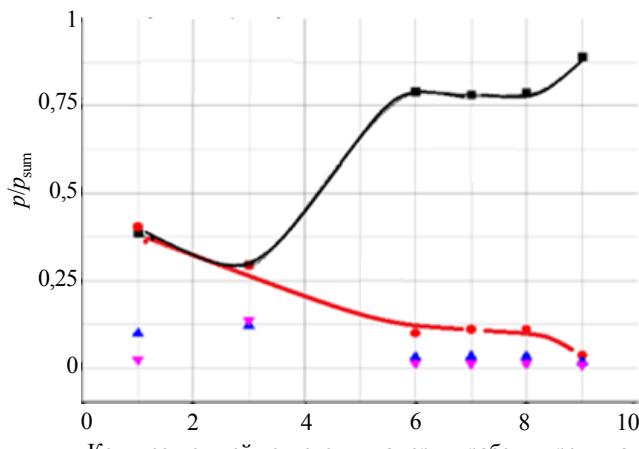


Рис. 1. Эволюция состава рабочего газа  $P/P_{sum}$  тлеющего разряда T-11M на водороде за «последние 10 дней» до завершения фазы очистки тлеющим разрядом: ■ —  $\text{H}_2$ , ● — вода, ▲ —  $^{17}\text{OH}$  (либо  $^{17}\text{NH}_3$ ), ▼ —  $^{28}\text{N}_2$  (либо  $^{28}\text{CO}$ )

условно завершается, когда параметры рабочего разряда перестают заметно меняться от импульса к импульсу. Иногда, чтобы достичь этого между рабочими импульсами, снова включают тот или иной «тренировочный» разряд с целью устранить влияние продуктов эрозии внутрикамерных элементов, оставшихся на стенах после предыдущего импульса. Как показывают оптические измерения поведения протия ( $\text{H}_2$ ), при использовании в качестве рабочего газа дейтерия ( $\text{D}_2$ ) фракция водорода на протяжении ещё длительного времени экспериментальной кампании оказывается сравнима с дейтерием, постепенно снижаясь с 30—40 до 5—7%, что однозначно указывает на поступление в плазменный шнур воды с поверхности тех или иных внутрикамерных элементов в процессе разряда под действием, например, UV-излучения плазмы [2]. Естественно ожидать, что наиболее вероятными источниками воды являются поверхности менее нагретых элементов камеры по сравнению с прогреваемой стенкой, обязанной собирать своей поверхностью водяные пары как в процессе подготовки при нагреве камеры, так и после завершения рабочего импульса.

## МЕТОД ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО «ОСУШЕНИЯ» СТЕНОК РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ ТСП И Т-11М

Тороидальная разрядная камера T-11M, прогреваемая текущим по ней индукционным током, по классической для токамаков традиции состоит из тонкостенных сильфонов с промежуточными толстостенными вставками [1]. Прогрев сильфонных стенок вакуумной камеры до высоких температур является эффективным методом их очистки от паров воды, однако часть их должна неминуемо оседать на ее менее нагретых толстостенных патрубках и других плохо прогреваемых элементах.

Для ускорения процесса подготовки вакуумной камеры T-11M к работе периодически применяется приём, использованный впервые на токамаке ТСП [2] и позволивший там в условиях крайне неравномерного нагрева различных частей разрядной камеры существенно выровнять температурные градиенты между её внутрикамерными элементами, что примерно на порядок снизило в ней остаточное давление паров воды. На рис. 2 показано поперечное сечение разрядной камеры ТСП [2]. Характерная особенность разрядной камеры ТСП состояла в том, что её конструкторы не посчитали нужным обеспечить её рабочую поверхность, обращённую в сторону плазмы, системой предварительного нагрева, посчитав, что для такой вакуумной камеры будет достаточно обеспечить нагрев горизонтальных и вертикальных патрубков до 300—400 °C (стрелки на рис. 2). Оказалось, однако, что, несмотря на столь высокие температуры патрубков, их теплопроводность и ИК-излучение не смогли обеспечить нагрев вакуумной камеры выше не-

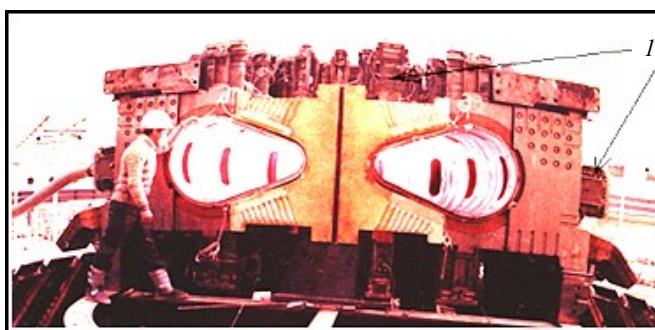


Рис. 2. Разрез разрядной камеры ТСП: I — элементы нагрева камеры

На рис. 1 в качестве примера показана эволюция состава рабочего газа тлеющего разряда T-11M ( $R/a = 0,7/0,25$  м) на водороде за «последние 10 дней» до завершения фазы очистки тлеющим разрядом и перехода токамака в так называемое «приемлемое состояние после открытия на атмосферу», т.е. когда становится возможным начинать попытки организации «тестового» рабочего разряда с током масштаба 70 кА и длительностью импульса больше 100 мс (в «чистом» длительность разряда в 2 раза выше, более 200 мс). Как следует из рис. 1, несмотря на ежедневную очистку тлеющим разрядом при прогреве камеры примерно до 200 °C, давление паров воды на протяжении 8 дней (~60 ч очистки) остаётся на уровне 20% от давления рабочего газа водорода.

Процесс вывода токамака в рабочий режим является результатом того, что параметры рабочего разряда перестают меняться от импульса к импульсу. Иногда, чтобы достичь этого между рабочими импульсами, снова включают тот или иной «тренировочный» разряд с целью устранить влияние продуктов эрозии внутрикамерных элементов, оставшихся на стенах после предыдущего импульса. Как показывают оптические измерения поведения протия ( $\text{H}_2$ ), при использовании в качестве рабочего газа дейтерия ( $\text{D}_2$ ) фракция водорода на протяжении ещё длительного времени экспериментальной кампании оказывается сравнима с дейтерием, постепенно снижаясь с 30—40 до 5—7%, что однозначно указывает на поступление в плазменный шнур воды с поверхности тех или иных внутрикамерных элементов в процессе разряда под действием, например, UV-излучения плазмы [2]. Естественно ожидать, что наиболее вероятными источниками воды являются поверхности менее нагретых элементов камеры по сравнению с прогреваемой стенкой, обязанной собирать своей поверхностью водяные пары как в процессе подготовки при нагреве камеры, так и после завершения рабочего импульса.

скольких десятков градусов. Соответственно при всей включённой вакуумной откачке давление остаточных газов в камере составляло не меньше  $10^{-4}$  Па, определяемое, в основном, парами воды. Для увеличения теплопереноса от патрубков к стенкам камеры был применён приём, получивший лабораторное название «осушение», а именно камера с предельно нагретыми патрубками заполнялась до атмосферного давления сухим азотом. Примерно через 1 ч экспозиции температура её отдельных частей достигала 100 °С и выше, после чего «влажный» азот откачивался из камеры вакуумными насосами и снова заменялся на «сухой» при атмосферном давлении, который, в свою очередь, откачивался через 1 ч экспозиции. Операция повторялась трижды, после чего давление водяных паров в камере ТСП снижалось на порядок величины примерно до  $10^{-5}$  Па. Это сделало возможным проведение плазменных экспериментов [1] с получением разрядного тока масштаба 100 кА.

Этот приём периодически использовался затем на токамаке Т-11М с целью ускорения перехода в рабочий режим после замены продольного литиевого лимитера и разгерметизации вакуумной камеры с той лишь разницей, что после включения индукционного прогрева камеры и достижения максимальной температуры её стенок до 150—220 °С вакуумная камера Т-11М наполнялась не азотом, а гелием при атмосферном давлении и выдерживалась в течение 1,5—2 ч. За счёт конвекции газ поступал в отдалённые места камеры, заметно прогревал удалённые патрубки, а также толстостенные вставки вакуумной камеры.

Выбору гелия предшествовал аналогичный эксперимент с аргоном, фактически заменившим азот, который был забракован в силу его высокой химической активности по отношению к литию, следы которого могли присутствовать на стенах камеры Т-11М после литиевых экспериментов.

В ходе проведения экспериментов температура камеры регистрировалась с помощью термопар, давление контролировалось с помощью вакуумного датчика Micro-Ion Plus. Температура прогрева различных элементов вакуумной камеры токамака Т-11М контролировалась с помощью инфракрасного термометра Mastech MS-6530. Парциальные давления различных примесей в вакуумной камере до и после прогрева регистрировались с помощью квадрупольного масс-спектрометра MKS RGA E-Vision 2.

На рис. 3 в качестве примера представлено распределение температуры в полярных координатах (вид сверху на Т-11М) по секциям вакуумной камеры, измеренное в ходе индукционного нагрева сразу после напуска газов Ar и He до давления  $10^5$  Па (пунктир), сплошная кривая — после выдержки (экспозиции) в течение 30 мин. Тонкостенные элементы вакуумной камеры (сильфоны) обозначены на рисунке стрелками.

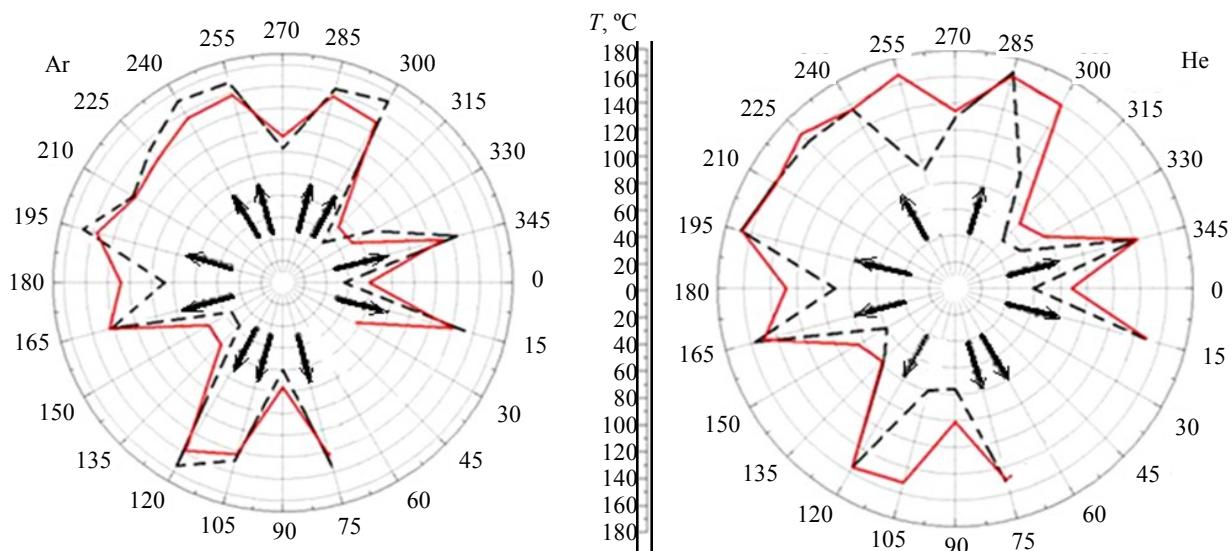


Рис. 3. Распределение температуры (длина луча от центра до кривой) вдоль камеры Т-11М при индукционном прогреве: — — — до напуска газов Ar и He; — — — после 30 мин экспозиции в атмосфере нагретых газов (стрелки отмечают положение сильфонов)

Как следует из приведённого рисунка, гелий оказался существенно более эффективным теплоносителем, чем аргон, что является очевидным следствием его меньшей массы, поэтому дальнейшие эксперименты по «осушению камеры» проводились с ним. Главной задачей, которую предстояло решить экс-

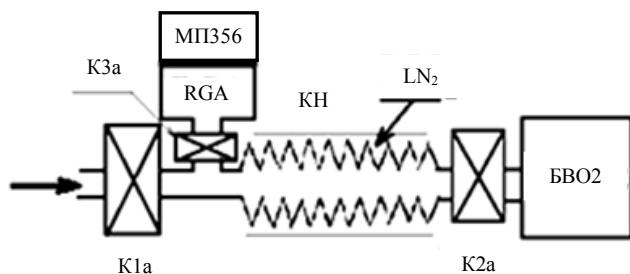


Рис. 4. «Пробник» содержания водяных паров во «влажном» гелии

спектрометра RGA, блокированного с широкодиапазонным датчиком давления MIP356 (Philips), криогенного насоса (КН) и блока высоковакуумной откачки БВО2. Всё устройство соединялось высоковакуумными клапанами K1a, K2a и K3a. Криогенный насос на основе сильфонного соединительного рукава Dy80 снаружи был изолирован теплозащитой с возможностью заливки жидким азотом пространства между сильфоном и защитой и затем быстрым прогревом током до 100—150 °C, подводимым к нему между K1a и K2a (100—150 A). Устройство соединялось с объёмом камеры (стрелка) через K1a и действовало следующим образом: внутренний объём КН, предварительно откаченный до вакуума масштаба  $10^{-3}$  Па при закрытых клапанах K2a и K3a, заполнялся пробной порцией «влажного» гелия из камеры tokamaka через открытый клапан K1a, далее клапан K1a перекрывался, а в «рубашку» КН заливался жидкий азот вплоть до прекращения кипения, затем объём КН через открытый клапан K2a откачивался насосом БВО2 до  $10^{-2}$  Па, после чего клапан K3a на RGA + MIP356 открывался и включался прогрев «рубашки» КН до 100 °C. По мере нагрева давление в камере КН росло (в основном за счёт  $H_2O$ ) вплоть до насыщения, являясь тем самым объективным индикатором содержания водяных паров в горячем гелии. Ход давления в начале прогрева фиксировался параллельно RGA и MIP356. Если давление начинало существенно превышать  $10^{-2}$  Па, RGA выключался и дальнейший контроль суммарного давления осуществлялся MIP356. После открытия клапана K2a на спаде давления RGA включался снова. Тем самым состав газа удавалось контролировать как в начальной стадии, так и в заключительной фазе анализа.

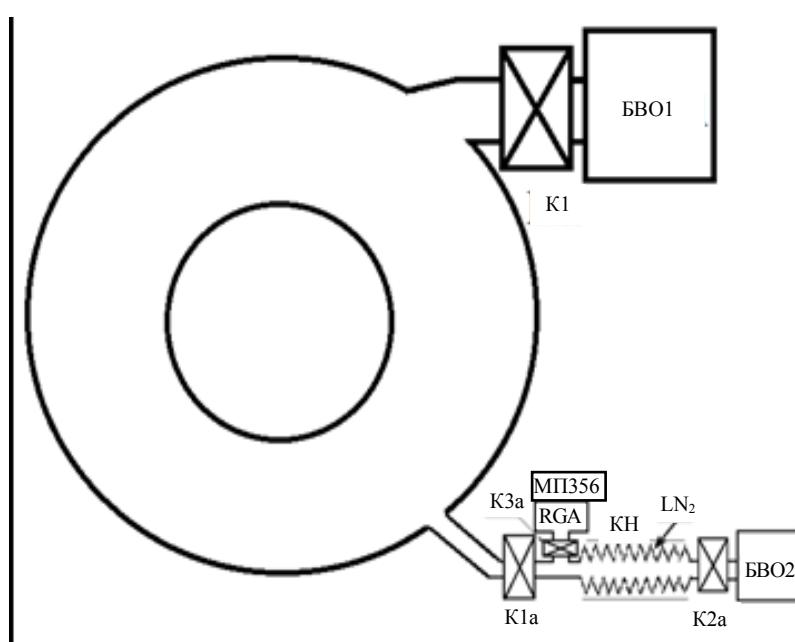


Рис. 5. Исходная схема «осушения» камеры Т-11М нагретым Не

нагретым гелием. Далее объём КН был отсечён клапаном K1a от камеры и произведено его охлаждение снаружи жидким азотом. После охлаждения КН клапан K2a был открыт и гелий откачен из КН с помощью БВО2 вплоть до  $10^{-2}$  Па. Затем КН был отсечён от БВО2 клапаном K2a и прогрет до 100 °C.

периментально, являлся выбор наиболее рациональной длительности гелиевой экспозиции, позволяющей «осушить» внутрикамерные элементы, наиболее удалённые от основных нагревателей — тонкостенных стальных сильфонов камеры. Для этого нужно было решить вспомогательную задачу детектирования содержания водяных паров в нагретом гелиевом объёме. Для её решения было собрано устройство, изображённое на рис. 4, состоящее из трёх основных элементов: масс-

спектрометра RGA, блокированного с широкодиапазонным датчиком давления MIP356 (Philips), криогенного насоса (КН) и блока высоковакуумной откачки БВО1. С целью определения временной динамики поступления паров воды в нагретый «сухой» гелий со стенок камеры и с её удалённых, плохо прогреваемых патрубков был проведён следующий эксперимент: разрядная камера Т-11М (рис. 5), снабжённая высоковакуумной откачкой (блок БВО1, клапан K1) и «пробником» водяных паров (см. рис. 4), была откачена до предельно возможного технологического вакуума (около  $10^{-4}$  Па), прогрета индукционным нагревом на протяжении 1 ч до температуры 100—200 °C (см. рис. 3), эвакуирована от БВО1 клапаном K1, а от БВО2 клапаном K1a, после чего заполнена гелием до атмосферного давления ( $10^5$  Па). Через 30 мин была сделана одна проба. При закрытом клапане K2a клапан K1a был открыт и объём КН заполнен горячим «влажным» гелием. Далее объём КН был отсечён клапаном K1a от камеры и произведено его охлаждение снаружи жидким азотом. После охлаждения КН клапан K2a был открыт и гелий откачен из КН с помощью БВО2 вплоть до  $10^{-2}$  Па. Затем КН был отсечён от БВО2 клапаном K2a и прогрет до 100 °C.

При этом давление в его камере КН поднялось до  $2,4 \cdot 10^{-1}$  Па (примерно в 25 раз), в основном, за счёт «вымороженной» из гелия группы масс «водяного спектра». Вторая проба с забором горячего «влажного» гелия из разрядной камеры Т-11М в КН по такой же схеме, проведённая через 2 ч после начала подачи гелия, дала близкое значение, но третья, проведённая ещё через 1,5 ч — примерно в 1,4 раза большее  $3,4 \cdot 10^{-1}$  Па. Отсюда можно было сделать вывод, что конвекция горячего «влажного» гелия в камере токамака Т-11М происходила сравнительно медленно с временами, сравнимыми с длительностью рабочего дня.

Правда, уже и её было достаточно, чтобы снизить на порядок остаточное давление паров воды и  $N_2$  (масса 28) в камере Т-11М. На рис. 6 показан RGA-спектр остаточных газов до «осушения» (сплошные линии) и на следующий день после него.

## «ОСУШЕНИЕ» С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ ГЕЛИЯ

С целью ускорения процесса «осушения» путём организации принудительной конвекции гелия было предложено дополнить схему вакуумной подготовки токамака (см. рис. 4) дополнительным контуром, включающим в себя постоянно функционирующие циркуляционный насос (ЦН) и криогенную ловушку АЛ для «вымораживания» жидким азотом паров воды и углекислого газа (рис. 7).

Такой дополнительный контур (рис. 8) был реализован на базе «сухого» (безмасляного) форвакуумного насоса спирального типа Agilent IDP-15 (ЦН). Он был соединён с разрядной камерой Т-11М вакуумным затвором К1<sub>6</sub>, блокированным с регулируемым газовым натекателем (не показан) и стандартной стеклянной ловушкой, погружённой в сосуд Дьюара, заполненный жидким азотом (АЛ). Было замечено, что в процессе работы внутренняя поверхность стеклянной ловушки постепенно мутнеет и, будучи отогрета, покрывается мелкими каплями воды, извлечённой из камеры. На рис. 9 показан вид ловушки после трёхчасовой циркуляции нагретого Н<sub>2</sub> через азотную ловушку. В ходе более длительной экспозиции 14 ч (7 + 7) было собрано около 1,5 см<sup>3</sup> воды, что позволило её взвесить на лабораторных весах ВЛР-200 (точность измерения 0,5 мг) и тем самым оценить среднюю эффективность нового способа сбора воды. После 14-часового сбора его эффективность снизилась почти до нуля, и сбор был прекращён.

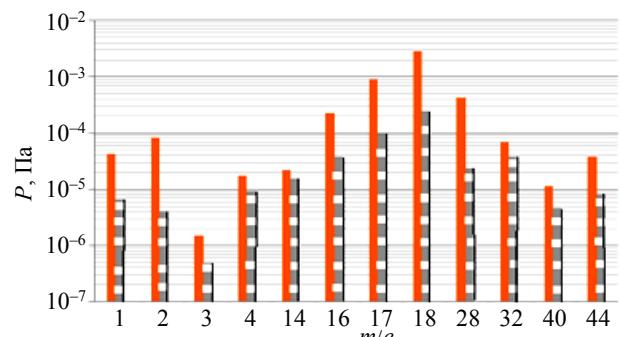


Рис. 6. RGA-спектр остаточных газов до осушения (■) и после (■)

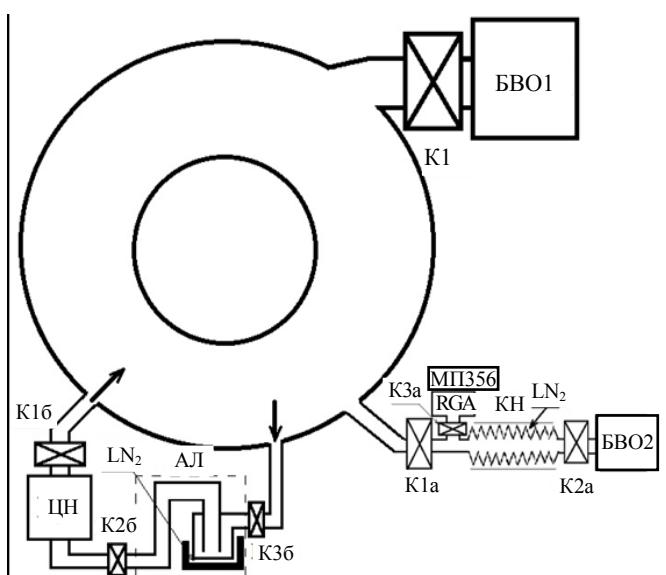


Рис. 7. Схема гелиевого «осушения» камеры токамака с дополнительным контуром циркуляции гелия



Рис. 8. Общий вид контура циркуляции гелия. На переднем плане планг входа, на заднем плане планг выхода в разрядную камеру



Рис. 9. Вид отогретой стеклянной ловушки с каплями воды на поверхности после трёхчасового сбора в составе контура циркуляции

Если бы удаление такого количества воды со стенок разрядной камеры Т-11М осуществлялось обычным способом — индукционным нагревом камеры до 200 °С и удалением воды высоковакуумными насосами (их фактическая скорость откачки в условиях Т-11М составляла около 30 л/с), то при среднем давлении  $10^{-2}$  Па на это понадобилось бы около 200 ч — почти месяц с учётом односменной работы, что близко к реальности. Таким образом, новый метод оказался эффективней не менее чем в 15 раз по сравнению с обычным. Кроме того, он позволяет захватить область плохо прогреваемых внутрекамерных элементов — активных источников воды, поступающих в плазму в процессе разряда. Прямое указание на это нам даёт то экспериментальное наблюдение, что следующий этап подготовки стенок токамака — тлеющий разряд на гелии — начался на Т-11М сразу «с зелёного свечения», т.е. со свечения нейтрального гелия, в то время как при обычной подготовке после перехода на тлеющий разряд в гелии плазма на протяжении почти двух недель продолжала светиться «белым» или «беловатым», что явно указывало на активное присутствие в плазме воды подобно тому, как это происходило на рис. 1 в тлеющем разряде на водороде.

Метод «осушения» по сути своей прост и понятен в интерпретации. Он позволяет сэкономить время и силы в ходе реанимации токамака после его открытия на атмосферу. Особенно полезен он был бы при запуске больших токамаков, таких как Т-15МД и ИТЭР.

В заключение авторы выражают благодарность Евгению Владимировичу Красильникову, начальнику Отдела газокриогеники ГНЦ РФ ТРИНИТИ, за понимание проблем и активное участие в работах по «осушению» камеры ТСП.

Работа проведена в рамках договора на выполнение НИОКР от 13.09.2019 № 313/1694-Д с АО «Наука и инновации» Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Azizov E.A., Kovan I.A., Mirnov S.V.** Status of experiments on TSP. — In: Proc.14 IAEA Conf. on Plasma Phys. and Contr. Nucl. Res. IAEA, Wurzburg, 30 Sept.—7 Oct. 1992. — Vienna: IAEA, 1993, vol. 1, p. 153—165.
2. **Artsimovich L.A.** — Nuclear Fusion, 1972, vol. 12, № 2, p. 215—252.



Валерий Алексеевич Морозов, ведущий инженер; АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 108840 Москва, Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12, Россия  
moryozov@triniti.ru



Анастасия Николаевна Щербак, ведущий инженер; АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 108840 Москва, Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12, Россия



Сергей Васильевич Мирнов, начальник отдела, профессор, д.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности, лауреат Государственной премии СССР и премии им. Л.А. Арцимовича РАН, член Международного комитета по координации физических исследований в поддержку проекта ИТЭР, эксперт МАГАТЭ по токамакам; АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 108840 Москва, Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12, Россия; профессор; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409 Москва, Каширское шоссе 31, Россия

Статья поступила в редакцию 20 мая 2020 г.

После доработки 28 июня 2020 г.

Принята к публикации 5 августа 2020 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 3, с. 5—10.