

УДК: 621.039.633

DOI: 10.53403/9785951505378_2023_299

Метод формирования сферического слоя изотопов водорода в криогенной мишени для лазерного термоядерного синтеза

М. А. Рогожина, Е. Ю. Зарубина

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров

oefimova@otd13.vniief.ru

Для формирования криогенного однородного по толщине слоя изотопов водорода в сферической оболочке используется метод радиальных температурных градиентов. Приведены варианты реализации этого метода, теоретическое обоснование возможности реализации метода в используемой конструкции бокса и результат эксперимента по формированию сферического слоя дейтерия, разнотолщинность которого удовлетворяет заданным требованиям.

Введение

Проведение экспериментов в области лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) предполагает использование криогенных мишеней. Мишень представляет собой полую сферическую оболочку с замороженным на ее внутренней поверхности гладким и однородным по толщине слоем твердого водородного топлива. Оболочка помещена в центр бокса, который обеспечивает ее равномерное тепловое окружение на этапе формирования криослоя и конвертацию лазерного излучения в рентгеновское на этапе проведения экспериментов по зажиганию.

К качеству криогенного слоя предъявляются высокие требования, в частности разнотолщинность слоя (отклонения от сферичности) не должна превышать 1 % [1]. Для симметризации слоя используется метод радиальных температурных градиентов. В упрощенном случае одномерной передачи тепла в радиальном направлении можно взять сконденсированный водородный слой с объемным источником тепла и теплоотводом на стенке сферической оболочки. Объемное тепло производится при бета-распаде ядер трития в случае содержащих тритий слоев и для ИК-выравнивания – при сферически равномерной ИК-подсветке оболочки [2]. Поскольку только одна сторона слоя имеет теплоотвод, в установившемся состоянии в слое будет развиваться радиальный температурный градиент с максимальной температурой на поверхности лед/пар и уменьшающейся температурой по направлению к теплоотводу (например, стенка оболочки).

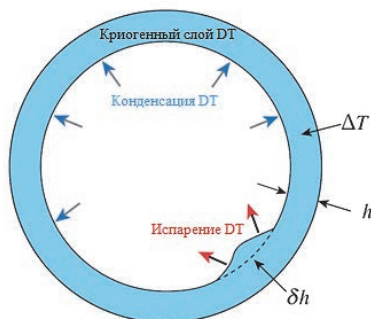


Рис. 1. Принцип работы метода радиальных температурных градиентов

Таким образом, на сегодняшний день наиболее эффективными и распространенными методами получения однородного криогенного слоя в мишенях непрямого облучения для экспериментов по ЛТС являются бета-выравнивание (в случае с DT-смесью) и ИК-выравнивание (для нерадиоактивных изотопов водорода).

В методе бета-выравнивания в качестве механизма выравнивания по толщине твердого DT-слоя используется тепло, выделяющееся в процессе

бета-распада трития [3]. Реализация метода предполагает выдерживание оболочки с водородным топливом в изотермических условиях при температуре ниже температуры замерзания топлива. В этом случае из-за большего выделения тепла в объеме толстой области DT-слоя ее поверхность будет более нагрета, чем поверхность тонкой области. Вещество слоя будет испаряться с более нагретой области и конденсироваться в менее нагретой области на поверхности слоя, как показано на рис. 1. Процесс выравнивания толщины имеет экспоненциальный характер, поскольку по мере выравнивания слоя градиент температуры на его поверхности снижается.

В методе бета-выравнивания источником внутренней энергии является процесс бета-распада атомов трития. Таким образом, этот метод применим только для содержащих тритий мишеней. При работе с нерадиоактивными изотопами водорода (D_2 , H_2) и их смесью (HD) энергия для объемного прогрева может быть подведена за счет внешнего ИК-облучения криогенного слоя [4, 5].

При пропускании инфракрасного излучения через вещество происходит возбуждение колебательных движений молекул. Однако поглощение происходит не во всем спектре падающего излучения, а лишь при тех длинах волн, энергия которых соответствует энергиям возбуждения колебаний в изучаемых молекулах.

Применение метода ИК-выравнивания [2] выглядит следующим образом. Оболочка с криогенным слоем помещается в изотермическую камеру (в центр внутренней сферической полости бокса), ИК-излучение заводится в эту внутреннюю сферическую полость, в результате чего криогенный слой поглощает излучение и нагревается. Чтобы выравнивать слои инфракрасным поглощением, длина волны должна быть выбрана для конкретного изотопа или смеси, в основном в диапазоне от 2 до 3,5 мкм (2,57 мкм – пик поглощения HD-смеси, 3,16 мкм – D_2). При этом так же, как и в методе бета-выравнивания, толстая область становится более нагретой, чем тонкая, в результате чего происходит перераспределение вещества и выравнивание слоя по толщине. Аналогично бета-выравниванию процесс ИК-выравнивания имеет экспоненциальный характер. В этом случае также предъявляются высокие требования к изотермичности экспериментального бокса, в котором располагается оболочка с топливом. Дополнительным требованием для ИК-вырав-

нивания выступает оболочка, прозрачная для инфракрасного излучения. Однако данный метод может использоваться для получения базовых знаний о физическом механизме образования криослоя водорода, о необходимой конструкции криомишени, алгоритмах проведения экспериментов на нерадиоактивных изотопах водорода, тем самым снижая риски, возникающие при работе с радиоактивными веществами.

Метод ИК-выравнивания может также успешно применяться при работе с твердым ДТ-топливом в качестве усиления эффекта бета-выравнивания (в случае, если тритийсодержащие слои не имеют требуемой однородности). Более того, именно комбинация обоих методов может значительно увеличить вероятность получения однородного криогенного слоя даже при наличии неоднородного температурного окружения оболочки с водородным топливом, а также сократить время формирования слоя.

В этой работе показан способ формирования однородного по толщине твердого слоя дейтерия с использованием ИК-излучения.

Методика проведения эксперимента

В качестве источника ИК-излучения был выбран твердотельный лазер с диодной накачкой среднего инфракрасного диапазона с центральной длиной волны 3,16 мкм и выходом под одномодовое оптоволокно. Средняя выходная мощность излучения составляет 80 мВт. В качестве проводника излучения был выбран одномодовый оптоволоконный кабель, изготовленный на основе оптических волокон из фтористого циркония (ZrF_4) с рабочим диапазоном в области длин волн 2,3–4,1 мкм.

В общем случае существуют две основные схемы проведения эксперимента по выравниванию криогенного слоя изотопов водорода в сферической оболочке с помощью инфракрасного излучения [6].

1. Схема «внешнего» облучения (рис. 2). Оптоволоконный кабель закреплен на пятикоординатном столике для ориентации пучка излучения в пространстве и заведения его в специальное отверстие бокса через окна криостата, криоэкрана и бокса.

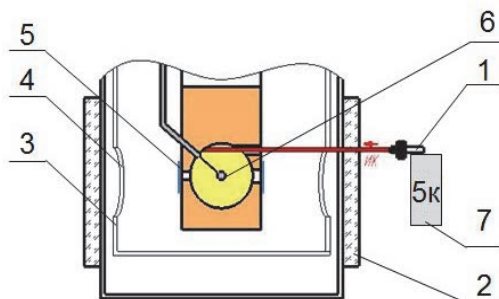


Рис. 2. Схема «внешнего» облучения: 1 – источник инфракрасного излучения, 2 – смотровые окна криостата, 3 – криогенный экран, 4 – окна криогенного экрана, 5 – окна бокса; 6 – сферическая оболочка с водородным топливом, 7 – столик пятикоординатный

Ключевой задачей является реализация нагрева только криогенного топлива рассеянным ИК-излучением, избегая попадания излучения на экспериментальный бокс и саму оболочку. Кроме того, необходимо подобрать материалы окон так, чтобы потери ИК-излучения при прохождении через них были минимальны.

2. Схема «внутреннего» облучения (рис. 3). Оптоволоконный кабель заводится непосредственно в отверстие бокса. Преимуществом данной схемы является гарантированное попадание пучка излучения непосредственно на оболочку и отсутствие потерь ИК-излучения, но технически реализовать данный метод гораздо сложнее из-за конструктивных особенностей расположения бокса в криостате и технических характеристик оптоволоконна.

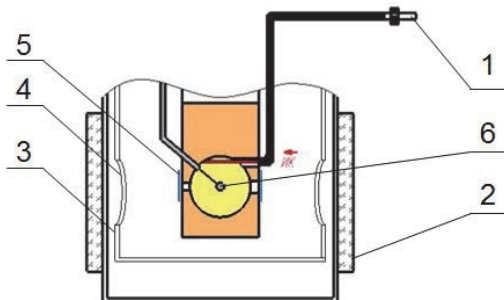


Рис. 3. Схема «внутреннего» облучения: 1 – источник инфракрасного излучения, 2 – смотровые окна криостата, 3 – криогенный экран, 4 – окна криогенного экрана, 5 – окна бокса, 6 – сферическая оболочка с водородным топливом

Приоритетной схемой проведения эксперимента по выравниванию криогенного слоя дейтерия в сферической оболочке с помощью ИК-излучения была выбрана схема «внешнего» облучения.

Эксперименты по формированию криогенного слоя изотопов водорода в сферической полистирольной оболочке проводились на стенде для исследования мишеней при низких температурах (рис. 4) [7]. Стенд состоит из исследовательского криостата со сменяемым мишенным узлом, системы одновременной откачки газовых магистралей, систем напуска гелия и изотопов водорода, оптической схемы визуального контроля, системы контроля температуры, ИК-лазера.

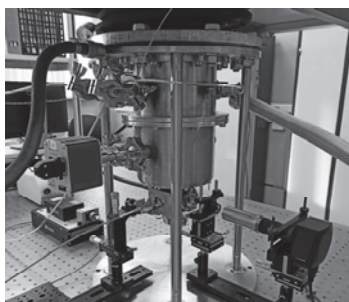


Рис. 4. Стенд для исследования мишеней при низких температурах

Эксперименты по получению криогенного слоя изотопов водорода проводятся в несколько этапов (рис. 5) [8]:

- откачка рабочего объема криостата и систем напуска газов (гелий, изотопы водорода) до 10^{-4} мбар;
- охлаждение экспериментальной сборки до 19 К;
- напуск теплообменного газа гелия в полость бокса (до 10^{-2} мбар);
- напуск изотопов водорода в сферическую полистирольную оболочку, дозирование количества жидкости в оболочке до необходимого уровня;
- понижение температуры с заданными параметрами скорости до полного преобразования жидкой фазы в твердую;
- перераспределение льда в оболочке с помощью ИК-нагрева.

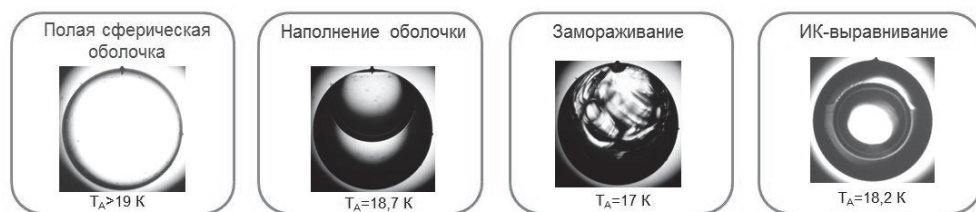


Рис. 5. Этапы формирования криогенного слоя изотопов водорода в оболочке

Тепловые расчеты конструкции и результаты экспериментов

Ключевым условием получения однородного по толщине криогенного слоя водородного топлива по методу радиальных температурных градиентов является выдерживание оболочки с водородным топливом в изотермических условиях, т. е. градиенты температур на поверхности сферической полости бокса, как и на поверхности оболочки, должны отсутствовать (в идеальном случае). С целью проверки выполнения условия изотермичности сферической полости бокса был проведен нестационарный тепловой анализ конструкции. Особый интерес вызвали результаты теплового расчета при включении источника ИК-излучения. Известно, что на длине волны 3,16 мкм коэффициент поглощения кварцевого стекла, из которого сделан капилляр, клеенный в оболочку, близок к 1. Поэтому на капилляр добавлена нагрузка, моделирующая поглощение рассеянного ИК-излучения капилляром. На рис. 6 видно, что до включения источника поверхность оболочки была относительно изотермичной, затем в месте вклейки капилляра оболочка стала теплее на 10 мК. При проведении эксперимента по формированию криослоя на конструкции бокса, приближенной к расчетной модели, были получены результаты, подтверждающие теорию. На рис. 7 отчетливо видно влияние капилляра: оболочка в месте вклейки капилляра теплее, следовательно, лед в этой области тоньше. Для увеличения отражательной способности капилляра нужно покрывать его золотом, что позволит снизить поглощение ИК-излучения со 100 до 4 % [9].

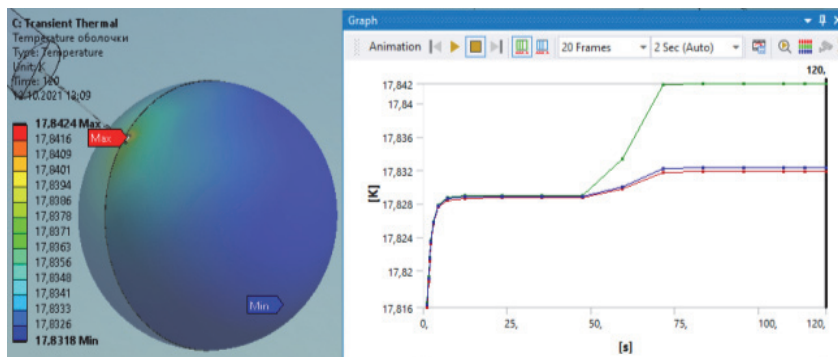


Рис. 6. Изменение распределения температур в оболочке

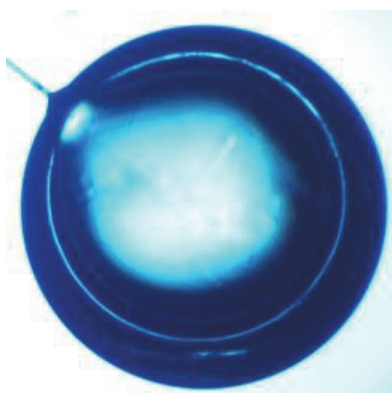


Рис. 7. Теневое изображение оболочки, полученное при проведении эксперимента на конструкции бокса, приближенной к расчетной модели

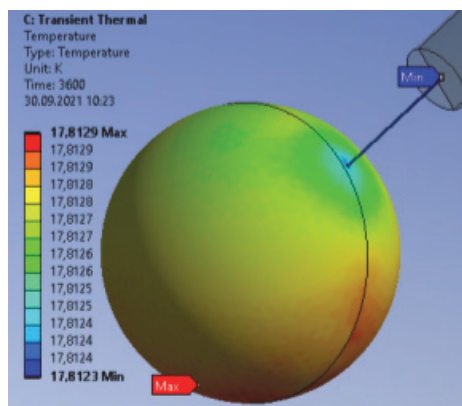


Рис. 8. Распределения температур в оболочке

Далее был проведен нестационарный расчет для капилляра с золотым напылением. На капилляр добавлена нагрузка, моделирующая поглощение 4 % рассеянного ИК-излучения стеклянным капилляром с золотым напылением. На рис. 8 представлены результаты расчета: использование капилляра с золотым напылением позволило исключить локальный нагрев в месте вклейки капилляра в оболочку от ИК-излучения, но теперь оболочка охлаждается в основном через капилляр и лишь немного через теплообменный газ. Это объясняется тем, что металлическая часть составного капилляра подачи изотопов водорода на большом участке контактирует с холодной стенкой бокса. Также наблюдается влияние теплопритоков от окон бокса.

На рис. 9 представлено теневое изображение оболочки, полученное в эксперименте на сборке, аналогичной расчетной модели. Отчетливо видно влияние капилляра сверху: оболочка в месте вклейки капилляра холоднее, соответственно, лед перераспределяется туда из более теплых областей, слой там становится толще. Кроме того, теплопритоки от окон греют области оболочки слева и справа на изображении, лед оттуда перераспределяется

в более холодные области, слой становится тоньше. Такое перераспределение происходит до выравнивания внутренней поверхности криослоя по изотермической поверхности.

Следующим этапом в достижении изотермичности оболочки является минимизация теплопритоков через окна криостата и бокса. Проведен нестационарный расчет с двумя закрытыми фольгой окнами бокса. На рис. 10 видно, что теплопритоки через закрытые окна прекратились, что положительно сказывается на тепловом окружении оболочки.

На рис. 11 представлено теневое изображение той же оболочки, что и на рис. 9, полученное в другом эксперименте, после закрывания окон фольгой. Очевидно, что, по сравнению с рис. 9, влияние окон устранено, а влияние капилляра сохранилось.

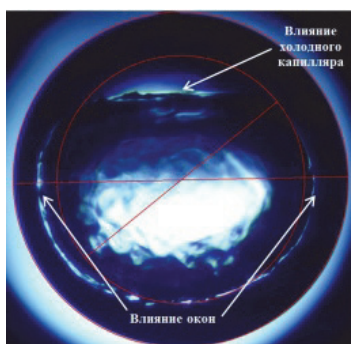


Рис. 9. Теневое изображение оболочки, полученное при проведении эксперимента на конструкции бокса, приближенной к расчетной модели

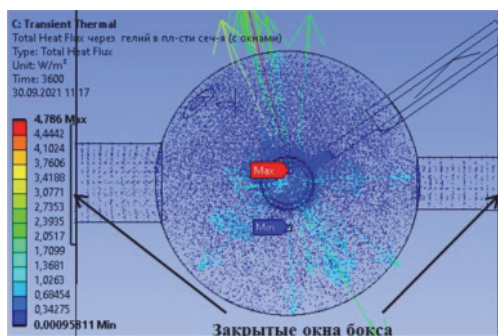


Рис. 10. Тепловые потоки в гелии в плоскости соединения половин бокса

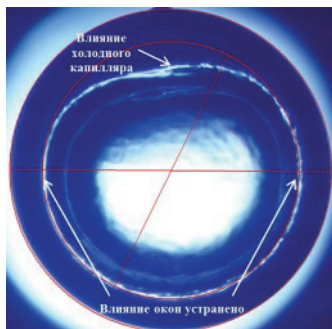


Рис. 11. Теневое изображение оболочки, полученное при проведении эксперимента на конструкции бокса, приближенной к расчетной модели

Для подтверждения возможности исключения влияния холодного стального капилляра на изотерму поверхности в следующем расчете стальной капилляр изолирован от стенки бокса полимерной трубкой. На рис. 12 показано, что большой тепловой поток от оболочки через капилляр прекратился, оболочка охлаждается через гелий. При этом поверхность оболочки является изотермической (рис. 13).

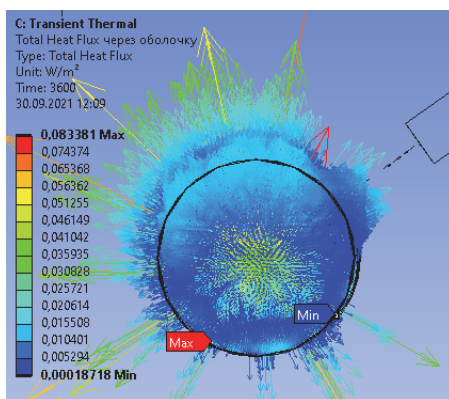


Рис. 12. Тепловые потоки через оболочку

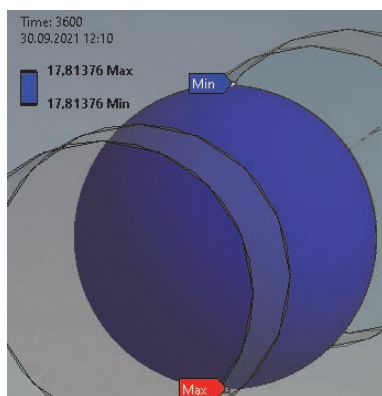


Рис. 13. Изотермические поверхности оболочки

Это означает, что при данной конфигурации экспериментальной сборки (стеклянный капилляр с золотым напылением, изоляция капилляра от стенки бокса, минимизация теплопритоков от окон) может быть выполнено условие равномерного теплового окружения оболочки для получения криогенного слоя с требуемой разнотолщинностью. Соответствующие изменения были внесены в конструкцию бокса, после чего проведена серия экспериментов по формированию однородного по толщине слоя дейтерия в оболочке.

В результате были получены слои дейтерия, удовлетворяющие требованиям разнотолщинности слоя. Результат одного из экспериментов приведен на рис. 14.

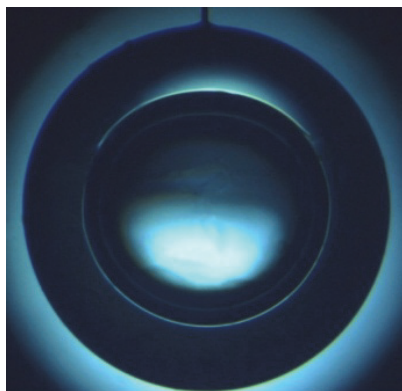


Рис. 14. Результат эксперимента по формированию криослоя дейтерия

Данный эксперимент по схеме «внешнего» облучения проводился на оболочке диаметром 1544 мкм. После напуска дейтерия в оболочку при $T = 19$ К (датчик температуры расположен выше сборки с оболочкой, поэтому приведенные температуры могут несколько отличаться от истинных значений температур на оболочке) и его ожигения температура сборки быстро понижалась до полной кристаллизации вещества ($T = 18,3$ К), а затем плавно повышалась с небольшим приращением ($\approx 0,001$ – $0,01$ К/мин), чтобы расплавить основную массу льда за исключением небольшого кристалла. Как только затравочный кристалл был получен ($T = 18,53$ К), температуру снижали с небольшой скоростью ($0,001$ – $0,005$ К через 5–10 минут в зависимости от динамики роста кристалла), одновременно нагревая вещество ИК-излучением. Такой режим формирования льда позволил получить относительно однородный слой льда без явных видимых дефектов за 180 минут от момента начала формирования льда из затравочного кристалла. Формирование слоя было завершено при температуре 18,5 К. Оценочная разнотолщинность [10] криогенного слоя дейтерия составила ≈ 1 % при средней толщине криослоя 311 мкм. Оптимальные температурные и временные параметры для выращивания монокристалла изотопов водорода, время жизни слоя и анализ дефектов и неоднородностей в его объеме являются задачами для дальнейших исследований в области создания криогенных мишеней и будут представлены в следующих публикациях по данной тематике.

Заключение

На данном этапе создания криомишеней для ЛТС проводится отработка всех технологических процессов создания мишени – от конструктивных особенностей мишени до влияния различных аспектов на формирование однородного слоя льда. На этом этапе актуальнее проводить эксперименты с нерадиоактивными изотопами водорода, чтобы снизить трудозатраты и исключить риски, которые возникают при работе с радиоактивными веществами. Для симметризации криослоя нерадиоактивных изотопов водорода применяется метод ИК-выравнивания. В экспериментах по формированию криогенного слоя дейтерия методом ИК-выравнивания были получены криослои с параметрами разнотолщинности, близкими к требуемым, что является важным этапом на пути создания криогенной мишени для ЛТС.

Список литературы

1. Kucheev S. O., Hamza A.V. Condensed hydrogen for thermonuclear fusion // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 108. P. 91–101.
2. Sangster T. C., Betti R., Craxton R. S. Cryogenic DT and D2 Targets for Inertial Confinement Fusion, LLE Review. Vol. 108.
3. Martin A. J., Simms R. J., Jacobs R. B. // Vac. J. Sci. Technol. 1988. Vol. 6. P. 1885.
4. Sangster C., Betti R., Craxton R. S., Delettrez J. A. // Phys. Plasmas. 2007. Vol. 14. P. 058101.
5. London R. A., Koziowski B. J., Marinak M. M., Kerbel G. D. // Fusion Sci. Technol. 2006. Vol. 49. P. 608.
6. Bittner D. N. et al. Forming Uniform HD Layers in Shells Using Infrared Radiation / UCRL-JC-131371, PREPRINT, Lawrence Livermore National Laboratory, 12.10.1998.
7. Осетров Е. И., Изгородин В. М., Пепеляев А. П. и др. Эксперименты по выравниванию криогенного слоя изотопов водорода инфракрасным излучением в сферической полистирольной оболочке // Сб. докл. 17-й науч.-технич. конф. «Молодежь в науке». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2019. С. 546.
8. Izgorodin V. M., Solomatina E. Y., Pepelyaev A. P., Rogozhina M. A., Osetrov E. I. The polystyrene microsphere filling with hydrogen isotopes through the fill tube with consequent freezing // J. of Phys. Conf. Ser. 2016. Vol. 747.
9. Bittner D. N., Collins G. W., Sater J. D. Generating Low Temperature Layers with IR Heating Preprint. UCRL-JC-143446. Lawrence Livermore National Laboratory, 31.01.2003.
10. Зарубина Е. Ю., Соломатина Е. Ю., Изгородин В. М. и др. Диагностика криогенного слоя изотопов водорода в сферической оболочке по теневым изображениям // Сб. науч. тр. V Международ. конф. «Лазерные, плазменные исследования и технологии». 2019. С. 320–321.