

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА

УДК 621.3.08+621.316

ЗАЩИТА ДОПЛЕРОВСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ НА УСТАНОВКЕ  
АНГАРА-5-1 ОТ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2026 г. А. В. Браницкий<sup>а</sup>, Е. В. Грабовский<sup>а</sup>, К. Л. Губский<sup>б</sup>,  
Г. М. Олейник<sup>а,\*</sup>, А. В. Ребезов<sup>б</sup>, И. Н. Фролов<sup>а</sup>, О. М. Шебела<sup>б</sup>

<sup>а</sup> *Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований*

*Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, 12*

<sup>б</sup> *Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”*

*Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31*

*\*E-mail: oleinik@triniti.ru*

Поступила в редакцию 24.04.2026

После доработки 08.07.2026

Принята к публикации 17.09.2026

Представлена постановка эксперимента по измерению скорости флаера системой ВИЗАР на установке Ангара-5-1. За счет того, что отсутствовала система зеркал и линз для доставки зондирующего излучения на флаер и сбора отраженного излучения, при откачке реакторной камеры не нарушалась юстировка. Зондирующий луч передавался непосредственно по оптоволокну до флаера. Отраженный от флаера луч передавался на интерферометры по другому оптоволокну. Концы этих оптоволокон закреплялись на детали, часть которой являлась флаером. Для защиты от воздействия тормозного излучения использовалось радиационно-стойкое оптоволокно марки ОКМ-100/110AL. В вакуумном объеме это оптоволокно располагалось внутри свинцовой трубы. Использование радиационно-стойкого оптоволокну с дополнительной защитой из свинца для подавления воздействия тормозного излучения оказалось достаточным для регистрации сдвига фазы в отраженном луче и регистрации скорости флаера.

**Ключевые слова:** ударник, флаер, фторид лития, ВИЗАР, лазер, интерферометрия, тормозное излучение.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Создание высокого давления с помощью магнитного поля тока, протекающего по образцу, позволяет надежно проводить исследования в области физики высоких плотностей энергий, получать мегабарные давления, разгонять образцы-флаеры до скоростей 10 км/с и выше [1–3]. Эксперименты по разгону флаеров проводятся на установках США [4] и Китая [5]. На установке Ангара-5-1 (РФ) была зарегистрирована скорость флаера из алюминия 10 км/с [6].

Лазерная неравноплечная интерферометрия, основанная на анализе доплеровского сдвига частоты в отраженном луче от движущейся поверхности исследуемого образца [7], широко используется для определения скорости поверхности образца [8]. Амплитуда регистрируемых сигналов при регистрации интерференционной картины при использовании ФЭУ составляет доли вольта. Поэтому подавление влияния различных помех при регистрации этих сигналов является очень важной процедурой.

При срабатывании установки Ангара-5-1 [9], где напряжения достигают 1 МВ, возникают электромагнитные наводки во всех цепях. Кроме того, при установлении магнитной самоизоляции в вакуумных передающих линиях возникает тормозное рентгеновское излучение, воздействующее на оптику и оптоволоконные кабели. На установке Ангара-5-1 была проведена работа [10] по подавлению электромагнитных наводок и влияния тормозного излучения. Флаер облучался зондирующим лазером с длиной волны 532 нм [11]. Благодаря принятым мерам удалось подавить электромагнитные наводки, возникающие при срабатывании установки Ангара-5-1, когда генерируются мегавольтные напряжения и мегаамперные токи в течение сотен наносекунд. Было подавлено также влияние тормозного излучения на оптоволоконные кабели и ФЭУ. Уровень помех был снижен до 12 мВ, что позволило зарегистрировать сигналы двух интерферометров: квадратурного неравноплечного интерферометра (КНИ) и квадратурного дифференциального неравноплечного интерферометра (КДНИ) [12].

Для защиты оборудования зондирующего лазера этот лазер располагался в экранированном помещении на большом удалении (около 60 м) от основных токоведущих частей. Срабатывание установки на него никак не влияло. Флаер располагался в вакуумной малой реакторной камере (МРК), которая перед выстрелом откачивалась до давления около  $10^{-4}$  торр. Луч зондирующего лазера доставлялся до флаера с помощью системы зеркал и линз в виде светового пучка, причем часть зеркал располагалась снаружи МРК, часть – внутри МРК у флаера на расстоянии более 1 м от фланца, разделяющего атмосферу и вакуум. Отраженный от флаера свет с помощью той же системы зеркал и линз направлялся в интерферометры. Часть зеркал и линз разрушалась после каждого эксперимента.

При этом имелась некоторая сложность при такой постановке эксперимента. Размер флаера составлял несколько миллиметров. Поэтому требовалась точная юстировка зондирующего луча. Эту юстировку можно было осуществить, находясь непосредственно внутри МРК, естественно, при атмосферном давлении. При откачке происходила деформация корпуса МРК и многих элементов внутри МРК. Поскольку, как было отмечено, часть зеркал располагалась снаружи МРК, часть – внутри МРК у флаера (на расстоянии более 1 м от фланца, разделяющего атмосферу и вакуум), в результате частично нарушалась юстировка зондирующего и отраженного лучей.

В настоящей работе представлена другая постановка эксперимента, в которой при откачке МРК не нарушалась юстировка. Раньше к флаеру (и обратно) зондирующий луч вводился в виде лазерного пучка с помощью зеркал и линз. Теперь к флаеру (и обратно) зондирующий луч доставляется с помощью оптоволоконна. Это позволило избежать потери юстировки при откачке МРК. Это достигалось за счет того, что отсутствовала система зеркал и линз. Отраженный от флаера луч передавался на интерферометры по другому оптоволоконну.

## 2. ЗАЩИТА ОТ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Система доставки излучения на флаер должна была отвечать нескольким требованиям. Во избежание наводок из-за мегавольтных напряжений и мегаамперных токов система регистрации требовала дополнительной изоляции, поэтому интерферометры, фотоприемники и осциллографы находились на удалении (примерно 60 м) от МРК в экранированной комнате. Для доставки излучения на поверхность флаера и сбора рассеянного пучка была использована следующая схема. Зондирующий лазерный луч с длиной волны 532 нм около лазера вводился в оптоволоконную трассу длиной примерно 60 метров. Второй конец этой трассы был вблизи флаера, и зондирующий лазерный свет попадал непосредственно из оптоволоконна на флаер. Отраженное лазерное излучение возвращалось по второму участку трассы той же длины, после чего с помощью разветвителя вводилось в два интерферометра. Концы этих оптоволокон у флаера закреплялись на детали, часть которой являлась флаером. Поэтому при откачке никакие смещения элементов внутри МРК не приводили к нарушению юстировки. Схема такого эксперимента представлена на рис. 1.

При этом каждая из двух оптоволоконных трасс состояла из двух участков. Первый (длиной около 60 м) был из многомодового оптоволоконна 62.5/125 мкм, находился при атмосферном давлении и доходил до крышки МРК. Второй участок (длиной около 1 м) находился внутри МРК. Сопряжение между этими оптоволоконнами осуществлялось оптическими герморазъемами [13].

|                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------|
| <b>Рис. 1.</b> Эксперимент по разгону флаера и измерению его скорости. |
|------------------------------------------------------------------------|

Оптоволоконно перестает пропускать свет при воздействии на него интенсивного тормозного излучения. На установке Ангара-5-1 проводились эксперименты по исследованию прозрачности одномодовых оптоволокон [14]. Было показано, что при воздействии импульса тормозного излучения внутри МРК потери на длине волны 655 нм достигают 90%, но после импульса ионизирующего излучения оптоволоконно восстанавливает свои оптические характеристики.

Хотя этот эффект проявляется меньше в инфракрасной области длин волн, у нас не было возможности изменить длину волны зондирующего лазера 532 нм. Поэтому для подавления

влияния интенсивного тормозного излучения на оптоволокно были предприняты следующие меры.

Находящийся внутри МРК второй участок (длиной около 1 м) был изготовлен из радиационно-стойкого оптоволокна марки ОКМ-100/110AL [15].

Оказалось, что радиационная стойкость оптоволокна марки ОКМ-100/110AL не является достаточной для экспериментов на установке Ангара-5-1. Специально проведенные эксперименты по контролю прохождения лазерного излучения с длиной волны 532 нм от зондирующего лазера до места расположения флаера и обратно показали, что при вспышке тормозного излучения лазерное излучение при прохождении по радиационно-стойкому оптоволокну внутри МРК ослабевает примерно в 4 раза. На рис. 2 представлены мощность лазерного излучения, проходящего по оптоволокну внутри МРК, и мощность тормозного излучения внутри МРК. Видно, что в момент возникновения тормозного излучения мощность прошедшего лазерного излучения сильно падает.

Для защиты оптических волокон внутри МРК (от крышки МРК до флаера) волокна были размещены внутри трубы из свинца длиной 1 м с толщиной стенки 10 мм (позиция 3 на рис. 1). Результат такой экранировки представлен также на рис. 2. Как видно, такая труба полностью экранирует тормозное излучение.

**Рис. 2.** Результаты экспериментов по контролю воздействия тормозного излучения на ...

Для подвода к флаеру зондирующего лазера и собирания отраженного излучения использовался волоконный датчик (ВД) – два параллельно сведенных радиационно-стойких волокна со сколотыми торцами, склеенные вместе. На рис. 3 представлена схема расположения волоконного датчика вблизи флаера. Та вертикальная часть детали “Анод”, к которой был приклеен кристалл фторида лития (LiF) толщиной 3 мм, являлась флаером. Волоконный датчик был приклеен к подставке, которая была приклеена к детали “Анод”. Таким образом, было надежным образом зафиксировано взаимное расположение волоконного датчика и флаера, которое не зависит от от качки МРК. На рис. 4 представлено теневое изображение расположения волоконного датчика вблизи флаера.

Расстояние между волоконным датчиком и поверхностью LiF составляло 0.4–0.6 мм. При таком достаточно близком подводе торца излучающего волокна к измеряемой поверхности интенсивность рассеянного от мишени излучения, попадающего на торец возвращающего излучение волокна, достаточна для проведения измерений.

**Рис. 3.** Схема расположения волоконного датчика на подставке вблизи флаера.

**Рис. 4.** Теневое лазерное изображение волоконного датчика вблизи флаера.

### 3. ВЫВОДЫ

Представлена постановка эксперимента по измерению скорости флаера системой ВИЗАР на установке Ангара-5-1, при котором при откачке МРК не нарушалась юстировка. Это достигнуто за счет того, что отсутствовала система зеркал и линз для доставки зондирующего излучения на флаер и сбора отраженного излучения. Зондирующий луч передавался непосредственно по оптоволокну до флаера. Отраженный от флаера луч передавался на интерферометры по другому оптоволокну. Концы этих оптоволокон закреплялись на детали, часть которой являлась флаером, поэтому при откачке никакие смещения элементов внутри МРК не приводили к нарушению юстировки.

Для защиты от воздействия тормозного излучения на оптоволокну использовалось радиационно-стойкое оптоволокну марки ОКМ-100/110AL. Внутри вакуумного объема это оптоволокну было защищено свинцовой трубой. Использование радиационно-стойкого оптоволокну с дополнительной защитой из свинца для подавления воздействия тормозного излучения оказалось достаточным для проведения экспериментов по измерению скорости флаера

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаркушин Г.В., Игнатова О.Н., Канель Г.И., Мейер Л., Разоренов С.В. Изв. РАН. Механика твердого тела. 2010. № 4. С. 155. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15130460>
2. Канель Г.И., Савиных А.С., Разоренов С.В., Фортков В.Е. Сб. Успехи механики сплошных сред. Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 257.
3. Cochrane K.R., Lemke R.W., Riford Z., Carpenter J.H. J. Appl. Phys. 2016. V. 119. P. 105902. <https://doi.org/10.1063/1.4943417>
4. Ao T., Harding E.C., Bailey J.E. et al. High Energy Dens. Phys. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.hedp.2016.01.002>
5. Jianjun Deng, Weiping Xie, Xianbin Huang. IEEE International Conference on Plasma Sciences (ICOPS), 2015. P. 1. <https://doi.org/10.1109/PLASMA.2015.7179766>
6. Oleinik G.M., Tkachenko S.I., Grabovski E.V. et al. J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1147. P. 012086. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1147/1/012086>
7. Dolan D.H. Foundations of VISAR analysis. SANDIA Report 006-1950. 2006. <https://doi.org/10.2172/886901>
8. Кузнецов А.П., Колесников С.А., Голубев А.А. и др. ПТЭ. 2011. № 3. С. 116. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16455614>

9. Альбикиов З.А., Велихов Е.П., Веретенников А.И. и др. Атомная энергия. 1990. Т. 68. № 1. С. 26. [https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya\\_t68-1\\_1990/p26/](https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t68-1_1990/p26/)
10. Александров В.В., Браницкий А.В., Грабовский Е.В. и др. ПТЭ. 2019. № 1. С. 62. <https://doi.org/10.1134/S0032816218060204>
11. Мощный непрерывный Nd:VVO<sub>4</sub> лазер 266/532/1064 нм, модель “Моцарт”. <https://www.tekhnoscan.ru/russian/mozart.htm>
12. Олейник Г.М., Браницкий А.В., Галанин М.П. и др. Физика плазмы. 2024. Т. 50. № 8. С. 905. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80253526>
13. Вакуумный герметичный оптоволоконный ввод “LEVVF”. [https://ldlab.ru/ldlab\\_lefv.html](https://ldlab.ru/ldlab_lefv.html)
14. Глушко В.В., Моисеенко А.Н., Таценко О.М., Филиппов А.В., Галанова С.В., Грабовский Е.В., Александров В.В., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М. Международная конференция XVI Харитоновские тематические научные чтения, 2014 г. Сб. докладов. Саров: ФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ”, 2016. С. 366.
15. Волокно оптическое с алюминиевым покрытием (HighOH). [https://www.forc-photonics.ru/ru/fibers\\_and\\_cables/Al\\_coated\\_fibers/1/372/](https://www.forc-photonics.ru/ru/fibers_and_cables/Al_coated_fibers/1/372/)

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Эксперимент по разгону флаера и измерению его скорости. Изображена вакуумная камера МРК с подключенными водяными передающими линиями (ПЛ). Внутри МРК передача тока к флаеру осуществляется по электродам ВТЛ: 1– зондирующий лазер; 2 – интерферометры, 3– экранирующая труба из свинца, внутри которой проходит оптоволоконно; 4– флаер; 1–4, 2–4 – оптоволоконно
- Рис. 2.** Результаты экспериментов по контролю воздействия тормозного излучения на прохождение лазерного излучения по радиационно-стойкому оптоволокону. Представлены зависимости мощности тормозного излучения (ТИ) и мощности прошедшего лазерного излучения внутри МРК от времени. На рисунке слева свинцовая труба отсутствует, справа – оптоволоконно расположено внутри свинцовой трубы
- Рис. 3.** Схема расположения волоконного датчика на подставке вблизи флаера. К флаеру приклеен кристалл LiF. Толщина кристалла LiF равна 3 мм, толщина флаера составляет 1 мм. Стрелками показано прохождение тока
- Рис. 4.** Теневое лазерное изображение волоконного датчика вблизи флаера. Толщина кристалла LiF равна 3 мм

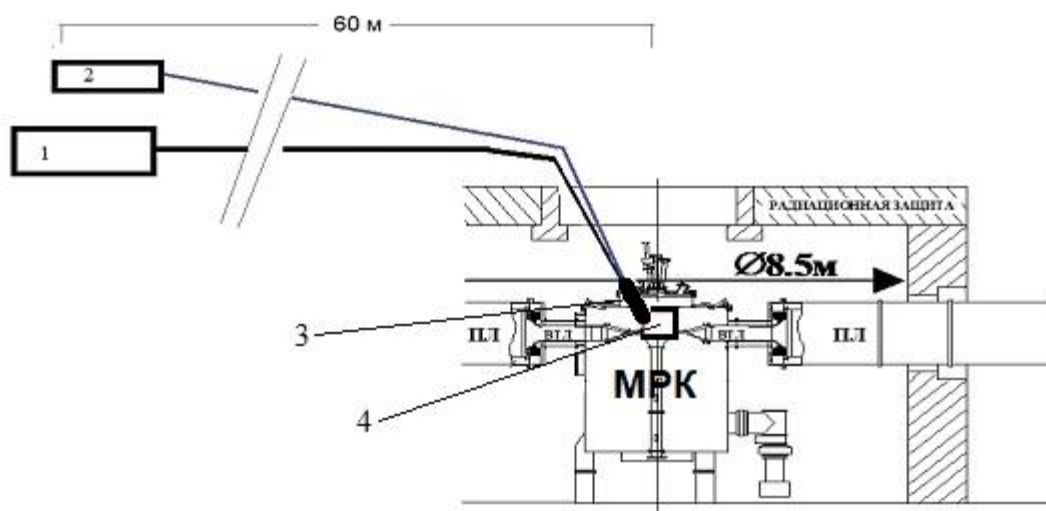


Рис. 1.

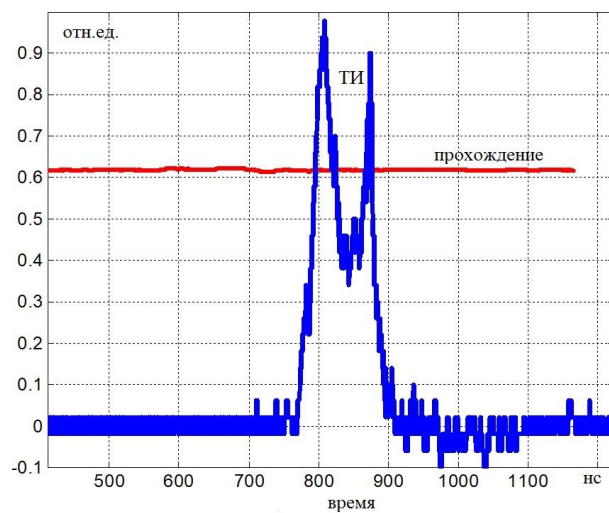
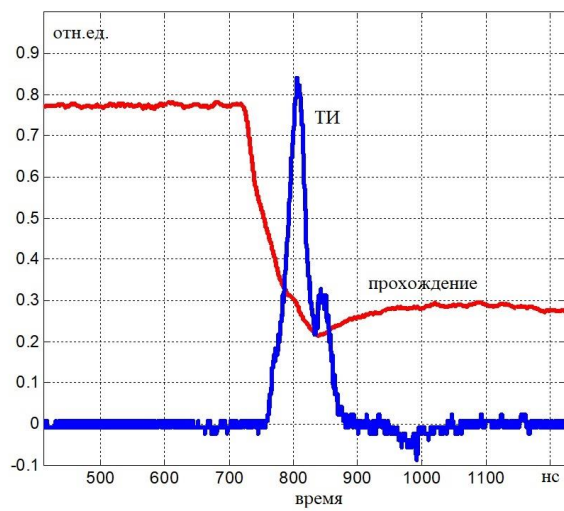


Рис. 2.

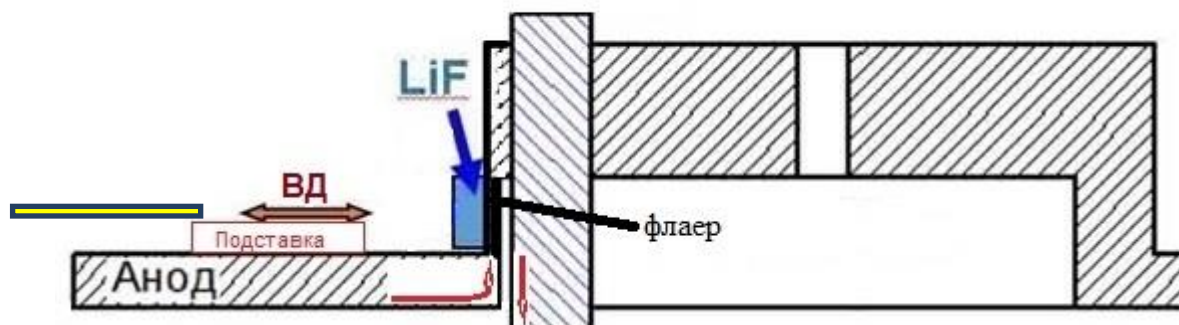


Рис. 3.



Рис. 4.