

### **Аннотация.**

В работе описана система оптической съемки, работающая в видимом диапазоне, обладающая длительностью экспозиции  $\sim 7$  нс и пространственным разрешением получаемых снимков  $\sim 5$  мм. Приведено описание ключевых компонентов системы и их характеристик. Представлены результаты применения данной системы в экспериментах по исследованию протяженных высоковольтных искровых разрядов на воздухе.

## **Введение.**

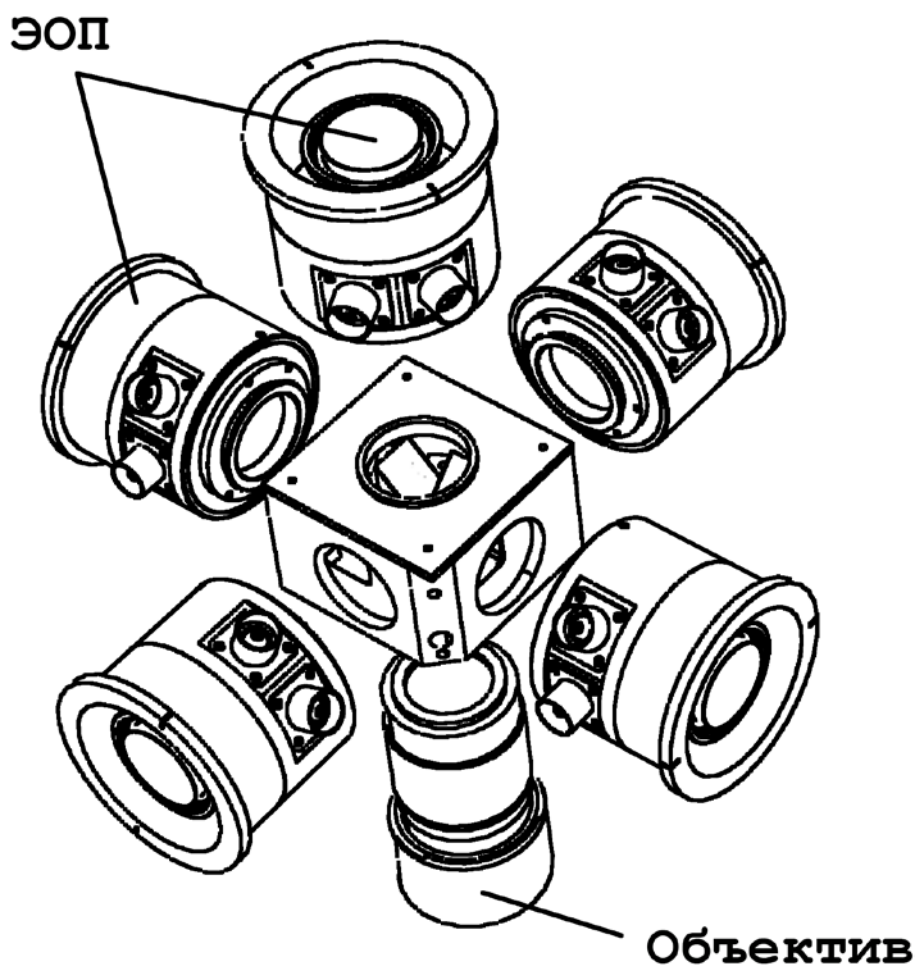
В своих исследованиях высоковольтного (порядка 1 МВ с фронтом нарастания 200 нс) протяженного (в пределах метра) искрового разряда мы уделяем основное внимание самой малоизученной стадии этого явления – стадии зарождения, точнее происходящим процессам в интервале времени от начала подъема напряжения в разрядном промежутке и до основного пробоя. Ионизационные процессы, происходящие в газах (в нашем случае – в воздухе при атмосферном давлении) на этой стадии сопровождаются излучением в широком диапазоне энергий, по которым можно судить о тех или иных явлениях, происходящих в разрядном промежутке. Чтобы получить максимум информации об излучении, генерируемом на начальной стадии разряда была создана пятиканальная система скоростной оптической съемки, работающая в видимом диапазоне длин волн. Система обладает длительностью экспозиции  $\sim 7$  нс, пространственным разрешением  $\sim 5$  мм и полем зрения диаметром 0,45 м в плоскости объекта наблюдения. Данная система используется для исследования зарождения и развития стримерно-лидерного процесса при высоковольтном искровом разряде в совокупности с имеющейся электротехнической и рентгеновской диагностикой.

## **Основные компоненты системы.**

Всю систему можно условно разделить на две части:

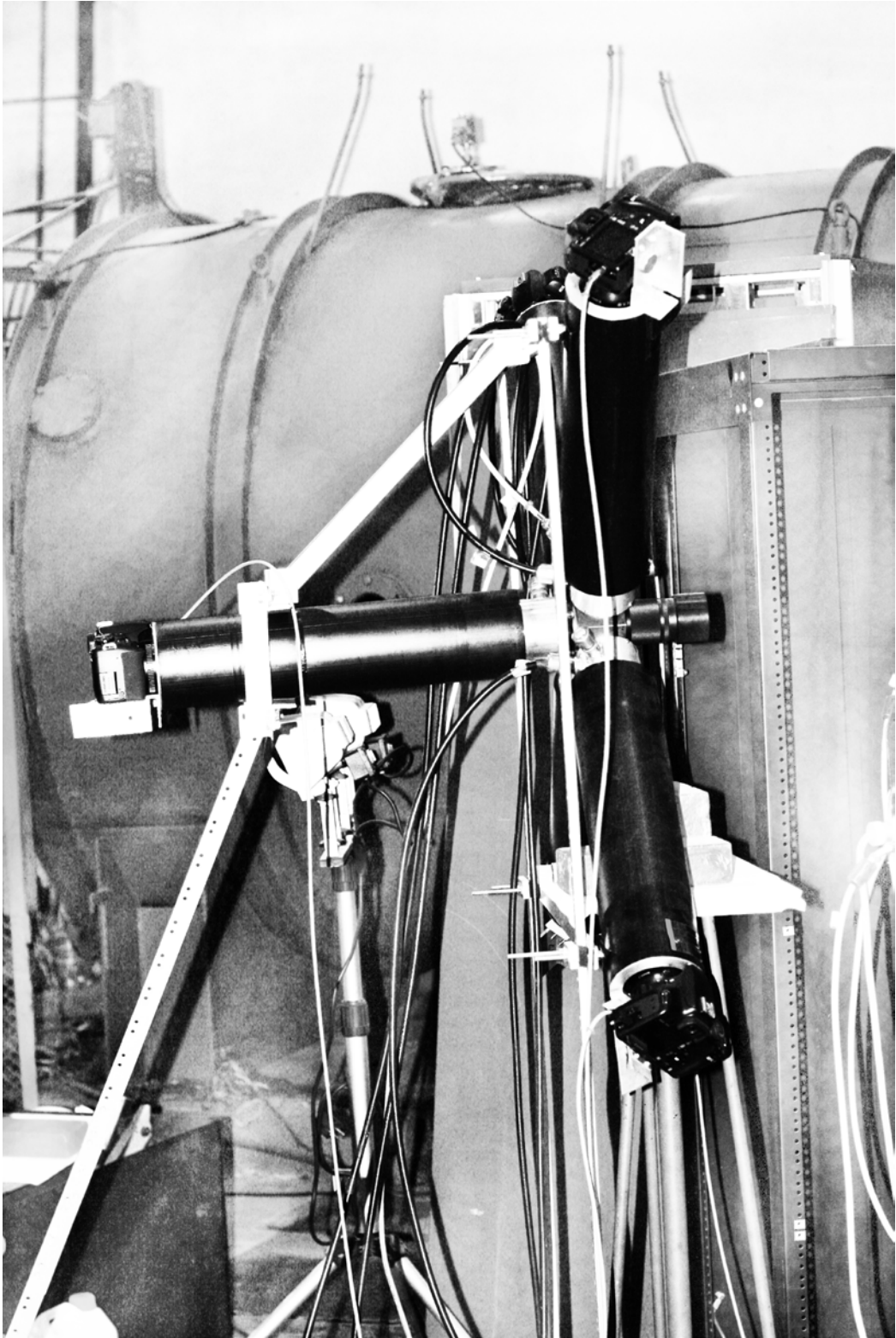
1. В оптическую часть входят: центральный объектив; набор оптических призм, собранных в одном корпусе; пять электронно-оптических преобразователей (ЭОП); пять цифровых фотокамер Canon серии 1000D с макро объективами; устройство удаленного открытия затвора; каркас. Внешний вид системы показан на Рис. 2.

2. Электрическая часть состоит из кабельного генератора, источника высокого (до 40 кВ) напряжения и линий задержки и коммутации.

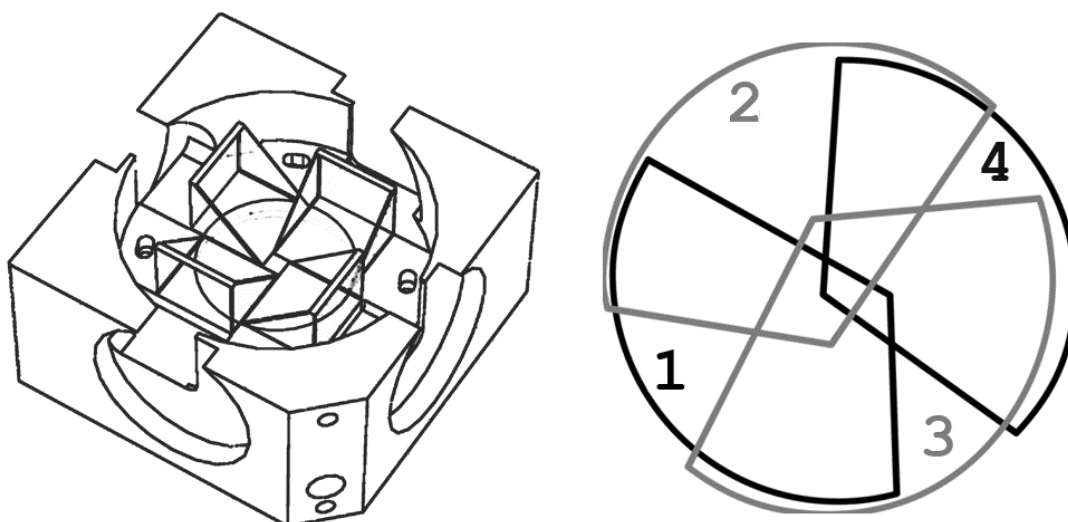


**Рис. 1** Схема пятиканальной системы.

Изображение проецируется центральным объективом, расположенным на главной оптической оси всей системы, на систему призм (Рис. 1), расположенных в фокальной плоскости этого объектива, где оно разделяется на пять частей и впоследствии попадает одновременно на пять ЭОПов. Без дополнительных преломлений и отражений передающее изображение оптическое излучение поступает на канал № 5 (осевой канал). На остальные же каналы, развернутые под углом  $90^\circ$  по отношению к главной оси и друг к другу, приходит оптическое излучение, содержащие информацию о, приблизительно, трети (по площади) исходного поля зрения в плоскости объекта (см. Рис. 3).



**Рис. 2 Внешний вид пятиканальной системы скоростной оптической съемки.**



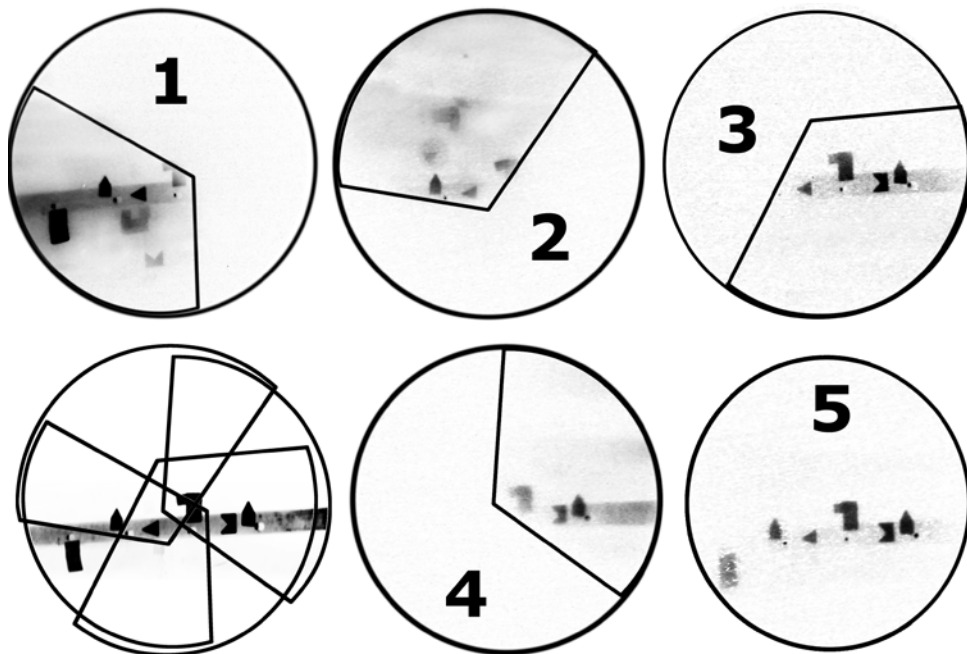
**Рис. 3** Схема деления изображения системой оптических призм (цифрами обозначены номера каналов).

В установке используются двухэлектродные ЭОПы первого поколения в качестве управляемых затворов и усилителей оптического сигнала (с относительно небольшим усилением  $G \sim 200$ ). Входные и выходные окна ЭОПов выполнены на базе волоконно-оптических пластин, диаметр рабочего поля фотокатода равен 27 мм. Компоновка системы позволяет работать как в импульсном режиме (до пяти каналов), когда управление открытием электронно-оптических затворов осуществляется путем подачи коротких (по времени) высоковольтных импульсов (диапазон напряжения импульса  $12 \div 16$  кВ) с многоканального кабельного генератора. Также возможна работа системы и в непрерывном режиме, - в обход кабельного генератора (до четырех каналов). В непрерывном режиме напряжение питания ЭОПов составляет всего  $2 \div 4$  кВ. Разрешение по объекту, находящемуся на расстоянии 2.2 м от торца центрального объектива системы, при съемке в непрерывном режиме составляет около 2 мм. Результат съемки в непрерывном режиме работы системы представлен на Рис. 4. При работе ЭОПа в импульсном (нештатном) режиме, разрешение падает до приблизительно 5 мм. Для съемки изображения с выходного окна ЭОПа (торца волоконно-оптической пластины) применяются цифровые фотокамеры, которые снабжены светосильными ( $D/F=1:1.8$ ) макрообъективами для минимизации потерь яркости сигнала, а

также пространственных габаритов системы (которые составляют  $D \times Ш \times В = 1.2 \times 1 \times 2$  м).

На Рис. 4 на снимках с каналов № 1 и 2 видно наложение повернутой на  $90^\circ$  и зеркально отображенной тусклой копии изображения на более яркое действительное изображение канала. Это связано с паразитными отражениями на гранях оптических призм, и происходит при относительно высокой яркости поступающего изображения.

На Рис. 5 показана схема кабельного генератора. В непрерывном режиме он, по сути, выполняет функцию коммутатора напряжения от источника на четыре канала (в силу особенностей конструкции переключение генератора в непрерывный режим приводит к блокировке вывода №3).



**Рис. 4** Схема деления исходного изображения по каналам на примере съемки тестового объекта в непрерывном режиме работы ЭОПов.

В импульсном режиме работы в кабельном генераторе вначале запасается заряд на коаксиальном кабеле, играющем роль конденсатора с распределенной емкостью (длинной линии), а при подаче запускающего импульса эта емкость разряжается параллельно по пяти линиям. Задержка сигнала на линии “электрод

разрядника – выходной разъем генератора” составляет 55 нс. Далее ЭОПы коммутируются с генератором кабелями разной длины, подобранной таким образом, чтобы напряжение на каждом ЭОПе появлялось в определенный момент времени после срабатывания разрядника. Стоит отметить, что вывод №1 кабельного генератора выполнен в виде коаксиального разъема на свободном кабеле и может использоваться без дополнительных коммутирующих линий. Остальные разъемы зафиксированы на корпусе кабельного генератора. Также сигнал подается через делитель на измерительный разъем (коэффициент деления 1:26).

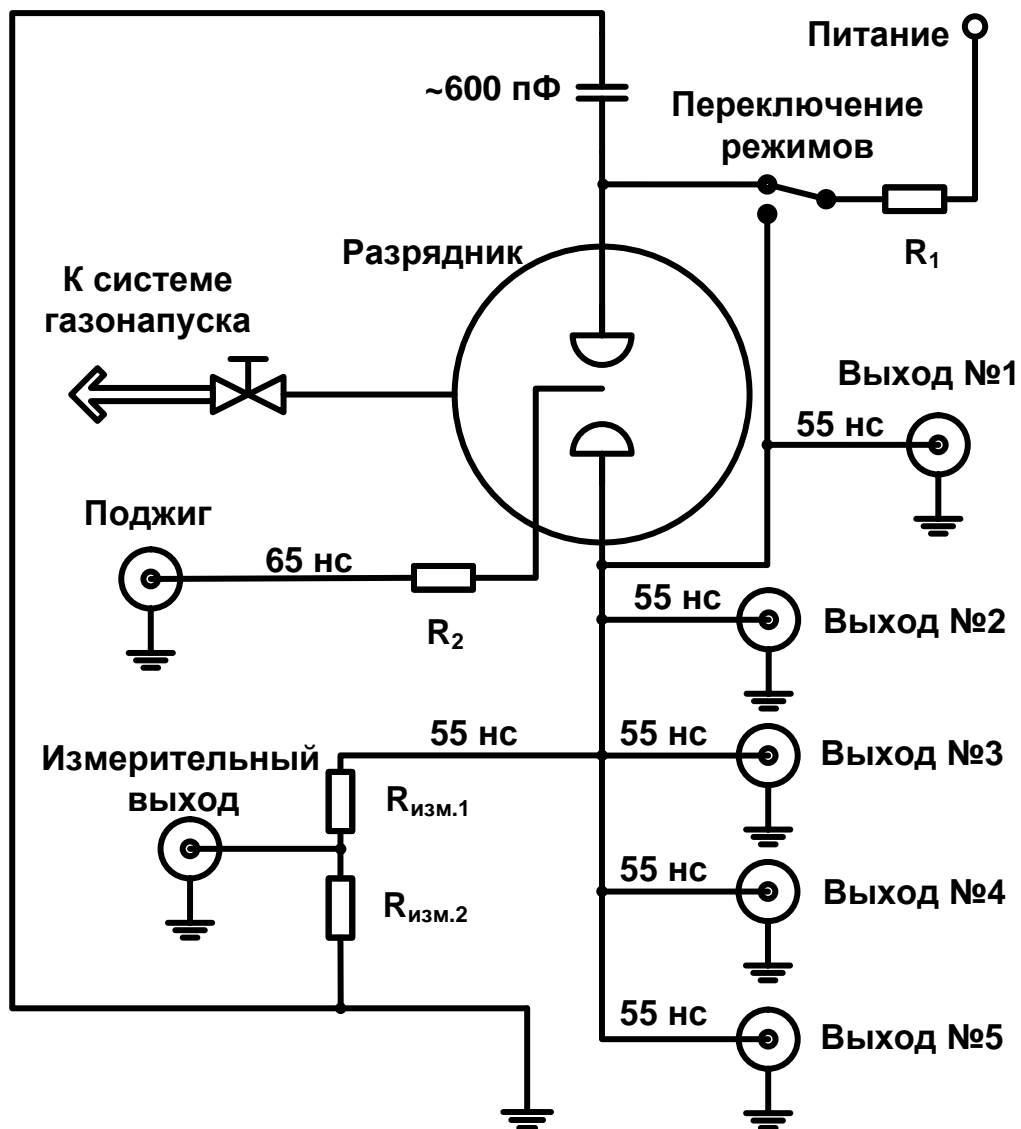
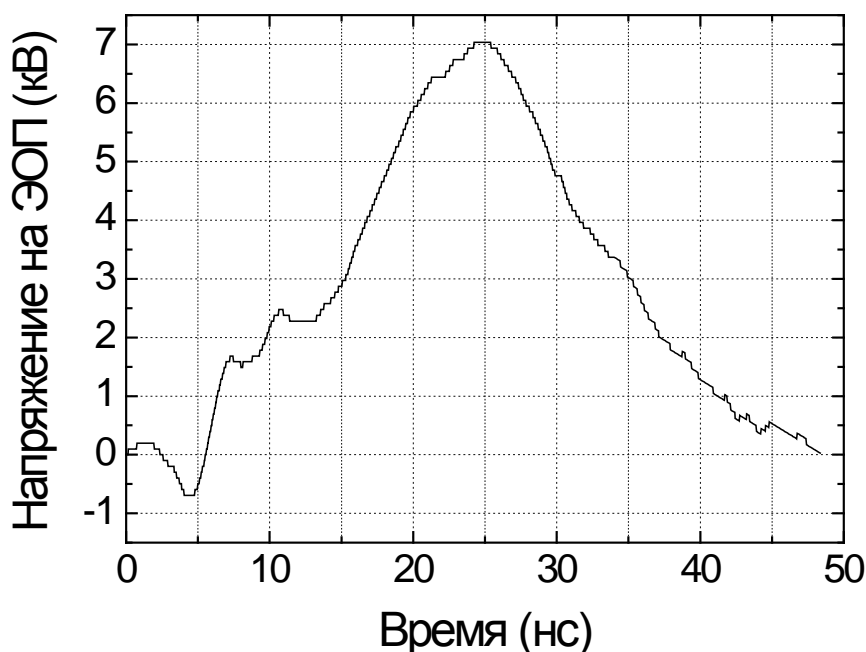


Рис. 5 Схема кабельного генератора.

Герметичная камера разрядника имеет вывод для газонапуска. В качестве рабочего газа может использоваться азот, осушенный воздух при давлении от 1 до 3 атмосфер.

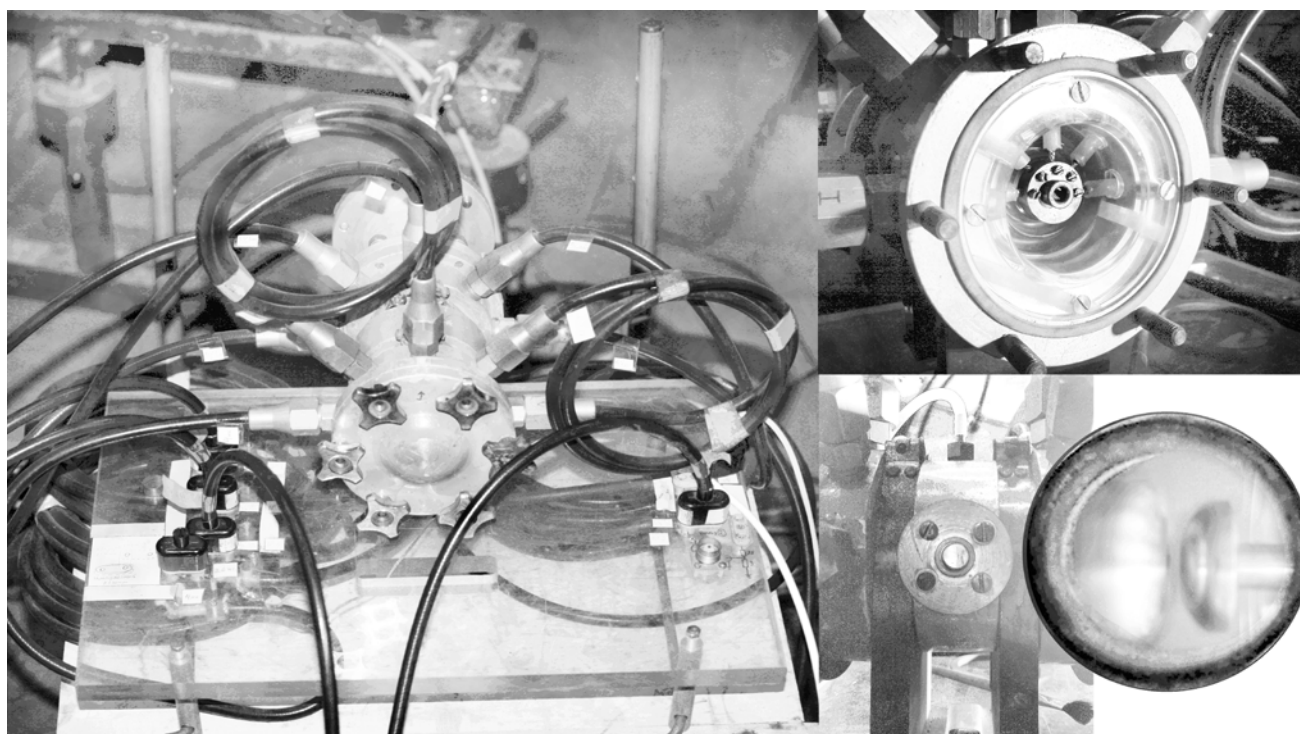
Как уже отмечалось, емкостью в кабельном генераторе являются два отрезка коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 75 Ом. Эти кабели подсоединены обоими концами к одному из электродов разрядника. Суммарная их емкость составляет 600 пФ, а время разряда – около 35 нс. На Рис. 6 представлена форма импульса, выдаваемого кабельным генератором. ЭОП в импульсном режиме начинает формировать выходное изображение при превышении значения напряжения на его электродах 6 кВ. Таким образом, эффективное время открытия электронно-оптического затвора составляет около 7 нс.



**Рис. 6 Импульс напряжения на выходе кабельного генератора.**

Собственное время срабатывания разрядника кабельного генератора сильно зависит от зарядного напряжения и зазора между электродами. Зазор может быть отрегулирован на оптимальное срабатывание с разбросом 50 нс при зарядном напряжении на емкости кабельного генератора.



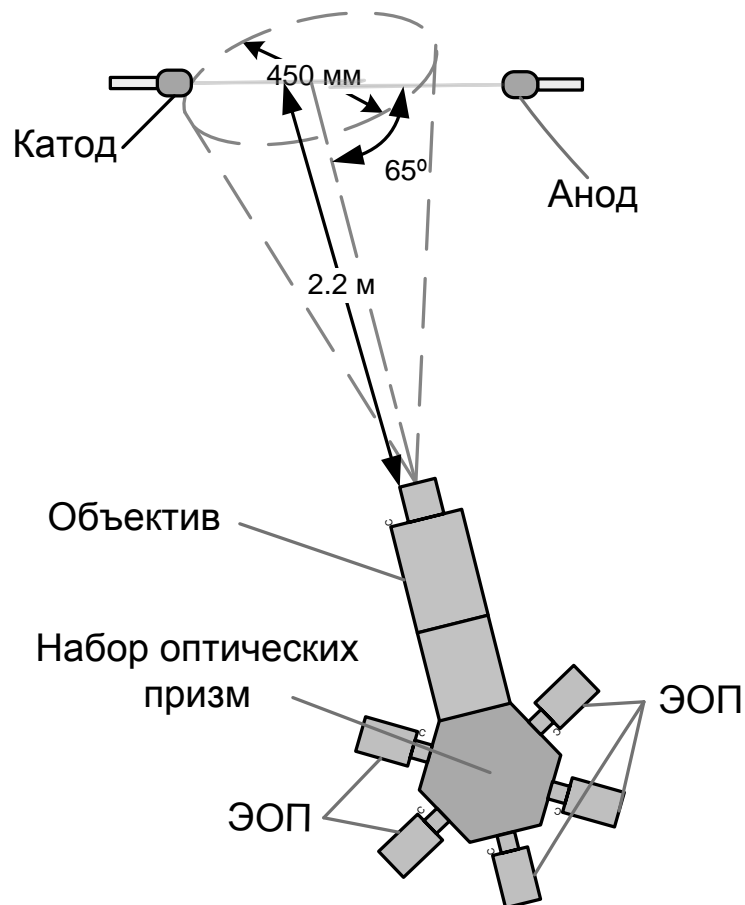


**Рис. 7 Внешний вид кабельного генератора.**

### **Методика проведения эксперимента.**

Пятиканальная система использовалась для исследования начальных стадий длинного искрового разряда. Маслонаполненный генератор импульсных напряжений (ГИН) выполненный по схеме Аркадьева-Маркса выдает импульс напряжения на разрядный промежуток через индуктивно связанную секцию проходного изолятора. Нашей целью было получить картину динамики стримерно-лидерного процесса, который развивается от начала подъема напряжения и до пробоя. Величина разрядного промежутка равнялась 600 мм. Амплитуда напряжения на катоде в проведенных экспериментах превышала -1 МВ с фронтом нарастания 200 нс, анод был заземлен. Длительность импульса напряжения (от начала подъема до пробоя) составляла около 1 мкс.

В силу особенностей конструкции экспериментальной установки, пятиканальная система была сориентирована таким образом, что оптическая ось центрального объектива находится под углом менее  $90^\circ$  к катод-анодной линии. Расстояние от переднего среза объектива до разрядного промежутка составляет 2,2 метра, центральный объектив “видит” область диаметром 450 мм. Схематически геометрия эксперимента показана на Рис. 8.



**Рис. 8 Схема расположения диагностик.**

Для генерации подаваемого на кабельный генератор запускающего импульса используется высоковольтный импульсный генератор (ВИГ) с выходным импульсом с амплитудой 25 кВ, который в свою очередь запускался шестиканальным генератором запускающих импульсов (ГЗИ), с амплитудой выходного импульса 200 В и возможностью в достаточно широких пределах (0,01-100 мкс) менять временную задержку между сигналами запуска кабельного генератора пятиканальной системы и запуска экспериментальной установки. Это позволило исследовать разные стадии высоковольтного протяженного искрового разряда.

Результаты применения пятиканальной системы скоростной оптической съемки в экспериментах.

В ходе экспериментов были получены снимки, иллюстрирующие начальные стадии развития длинной искры в атмосферном воздухе – проращивание стримерно-лидерного канала.

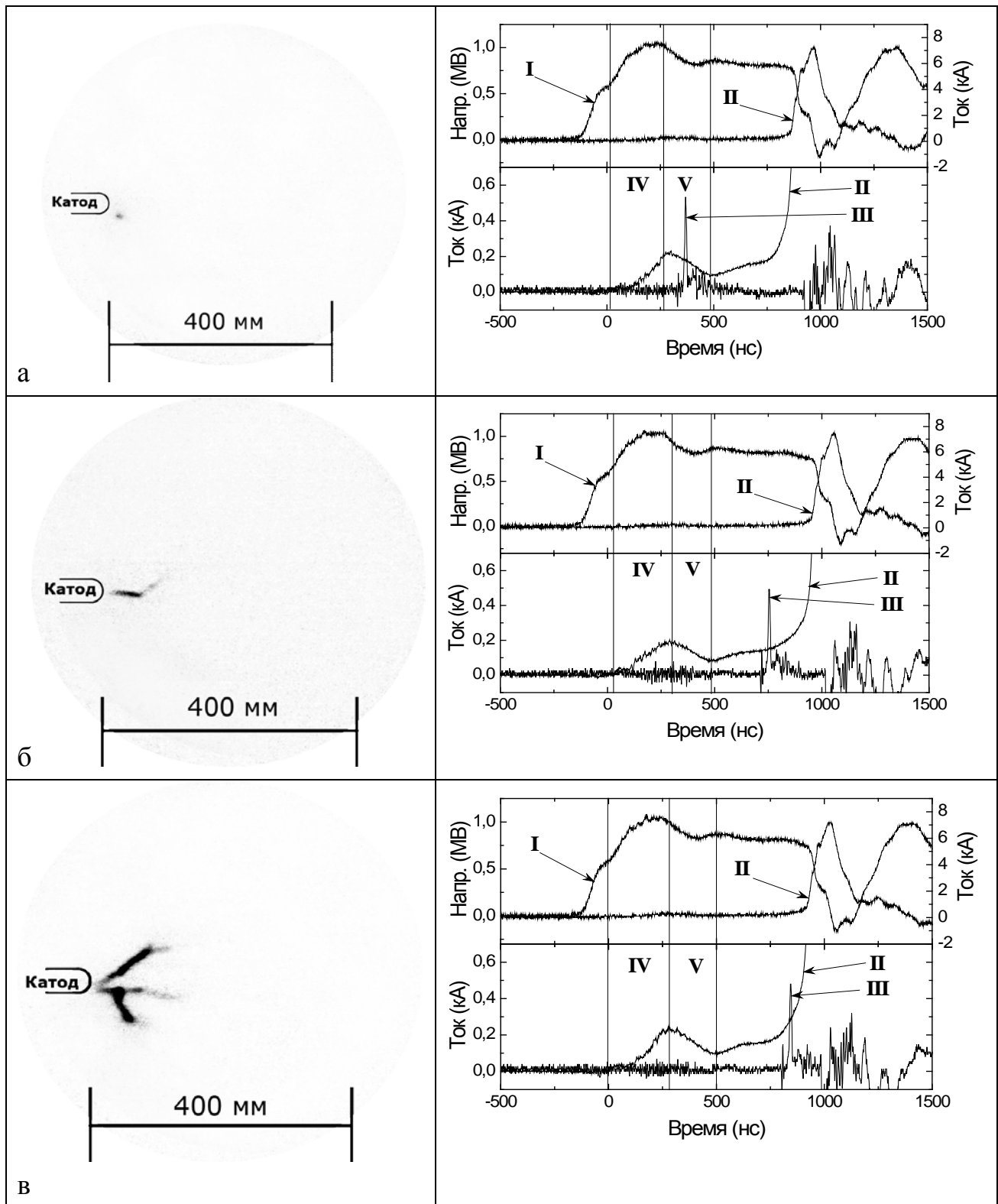
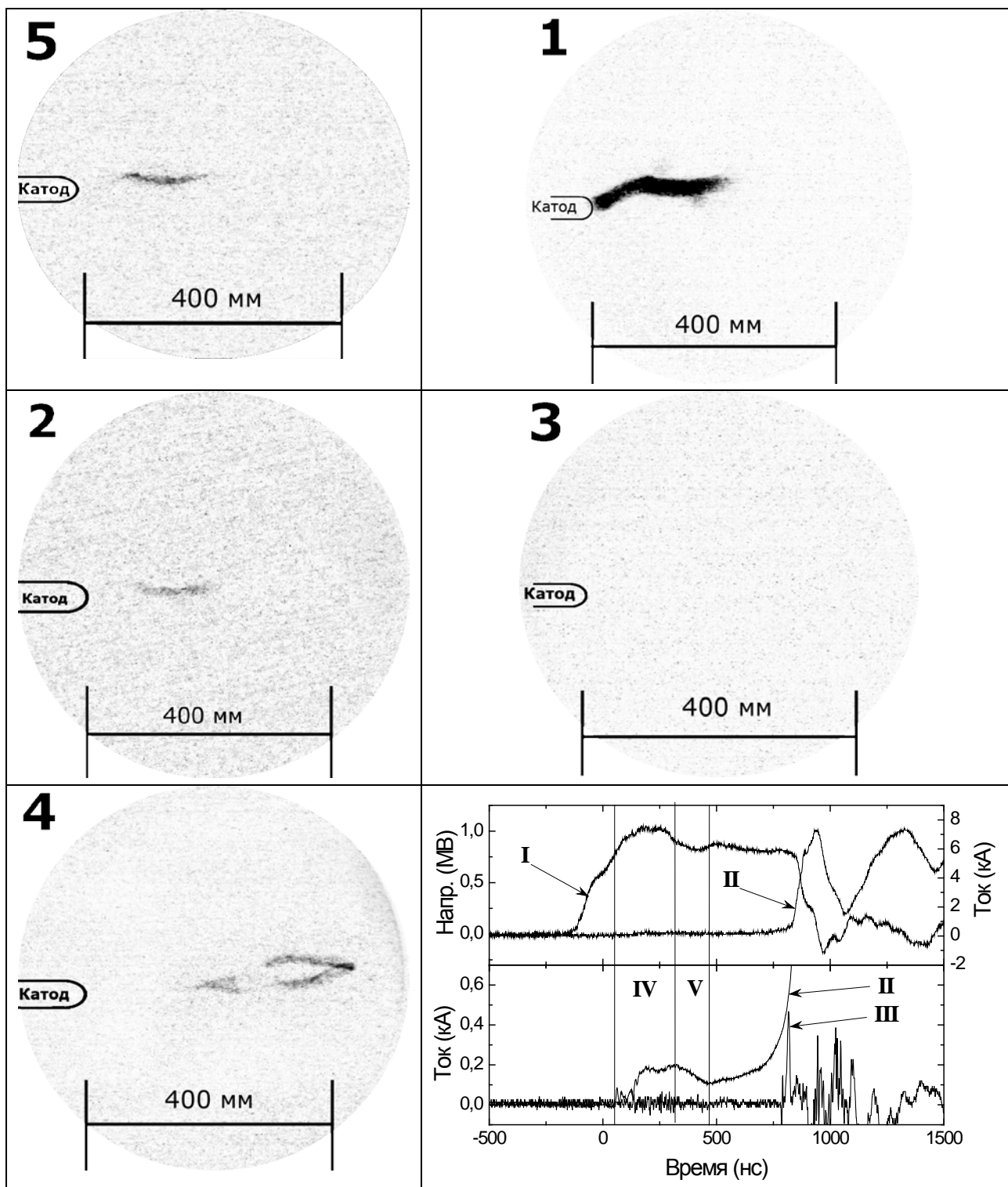


Рис. 9 Снимки разряда с осциллограммами.



**Рис. 10** Снимки, полученные с помощью пятиканальной системы. Снимки расположены в хронологическом порядке, цифрами отмечены номера каналов.

На Рис. 9 приведены кадры, сделанные в разных “выстрелах”. Номерами на осциллограммах обозначено: I – кривая напряжения; II – кривая тока; III – сигнал, открывающий первый (по порядку) электронно-оптический затвор (каждый последующий открывается через 10 нс после предыдущего); IV и V – промежутки времени, соответствующие нарастанию и спаду предымпульса тока, соответственно. Рис. 9 иллюстрирует, как стримерно-лидерный канал прорастает от катода, при этом “ответная часть” находится за пределами кадра (в поле зрения объектива попадает 75% длины разрядного промежутка) на ранних стадиях развития разряда. Это обусловлено более поздним стартом стримерно-лидерного процесса на аноде. На снимках видно относительно яркое свечение уже на спаде предымпульса тока (Рис. 9, а). Эксперименты показали, что по мере спада сигнала тока (в интервале между предымпульсом и основным током) свечение, регистрируемое пятиканальной системой, сначала угасает, а затем на определенном расстоянии (по времени) от фронта основного тока начинает снова разгораться. Это согласуется с результатами ранних экспериментов по регистрации излучения видимого диапазона на установке ЭРГ [1]. На предымпульсе тока область свечения представляет собой округлое пятно (диаметром около 20 мм) локализованное на конце катода. Последующий же импульс свечения развивается со временем от пятна до длинной ломаной линии, зачастую ветвящейся (Рис. 9, в), характерной для разряда длинной искры и молнии. На снимках на конце светящегося канала можно заметить яркое пятно (головка лидера), и тусклое ответвление (отдельный стример из стримерной зоны, см. Рис. 9, б) приблизительно в направлении анода.

На Рис. 10 представлены снимки со всех каналов пятиканальной системы, сделанные в одном “выстреле” экспериментальной установки. Временная задержка между запусками ЭОПов реализована через кабельные линии фиксированной длины, и составляет 10 нс между соседними (по номеру) каналами. При этом падение амплитуды питающего импульса, приходящего на последний канал, относительно первого не превышает 2.5%. В эксперименте, результаты которого представлены на Рис. 10, первым запускался канал №5, через 10 нс канал №1 и далее по порядку. Несмотря на столь малую задержку между каналами на Рис. 10 можно увидеть развитие стримерно-лидерного процесса. На первом кадре (канал №5) видна очень тусклая линия, отходящая от катода, которая после резкого изгиба становится довольно яркой. На втором кадре (канал №1) видно не-

большое ответвление вниз около правого конца светящегося канала. А на последнем кадре (канал №4) видны правый край стримерно-лидерного канала, прорастающего с катода, в форме “<”, и его “ответная часть”, прорастающая с анода. Оба этих ветвящихся канала готовы через несколько десятков наносекунд пересечься и, таким образом, завершить создание горячего проводящего канала и дать дорогу основному току разряда. Таким образом, мы видим, как небольшое ответвление стримерно-лидерного канала за 50 нс возникло и проросло на приблизительно 50 мм (скорость около  $10^9$  см/с).

Отметим следующую особенность системы. На втором кадре (канал №1) видна кривая стримерно-лидерного канала, причем можно заметить, что участок после резкого изгиба ярче, чем участок до изгиба. На первом кадре (канал №5) относительно хорошо заметен упомянутый яркий участок, расположенный после изгиба, и совсем не виден участок до изгиба. Это связано с заметной разницей яркости разных ЭОПов. Наименее ярким является канал №3, на котором практически невозможно разглядеть стримерно-лидерный канал, однако можно увидеть главную (наиболее яркую) стадию разряда. Яркость можно увеличить, подняв напряжение в питающем импульсе, однако это невозможно сделать независимо для каждого канала в данной конфигурации системы. В результате ограничение на максимальное значение напряжения питания накладываемое самым ярким ЭОПом (канал №1). Такое положение дел немного затрудняет анализ получаемых результатов, однако данная пятиканальная система представляет собой всего лишь первый прототип (который показал свою работоспособность уже в приведенном варианте) и будет модернизироваться в ближайшем будущем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Огинов А.В., Чайковский С.А. и др. // Труды научной сессии НИЯУ МИФИ – 2010, Т II, М. С.92-95