



ТРИНИТИ  
РОСАТОМ

# Концепция прототипов плазменных ракетных двигателей с повышенными параметрами тяги и удельного импульса на базе магнитоплазменного ускорителя

Гуторов Константин Михайлович  
Руководитель проекта

## **Актуальность проекта:**

Для активного освоения космоса, регулярного обмена грузами между Землей и Луной, полетов к Марсу требуется создание космического транспортного модуля с высокой энерговооруженностью. На данный момент в кооперации Росатома и Роскосмоса разрабатывается проект такого модуля с источником энергии – ядерным реактором мощностью 1 МВт. В качестве двигательной установки должны быть разработаны плазменные двигатели мощностью несколько сотен кВт.

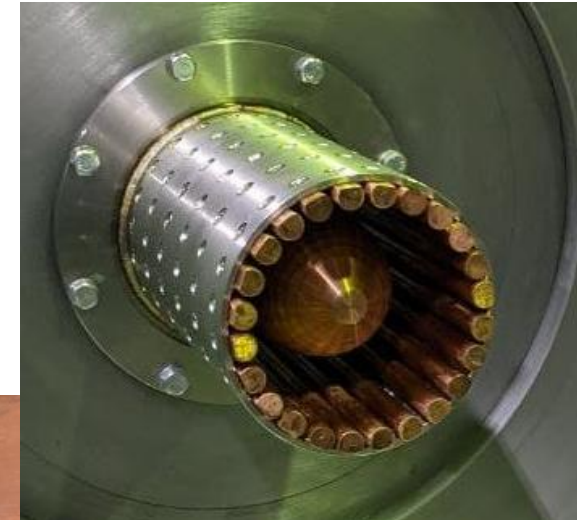
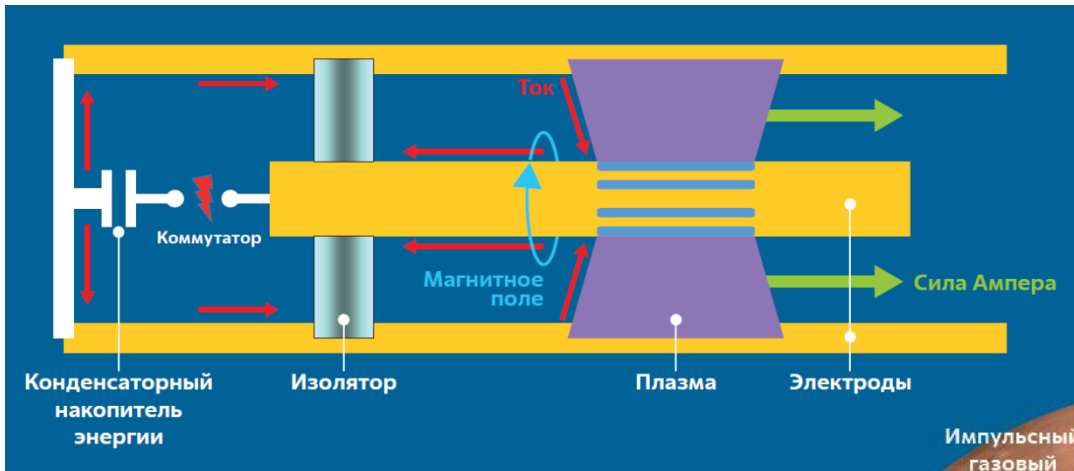
Предлагается создание прототипа двигателя на базе магнитоплазменного ускорителя, позволяющего практически неограниченно наращивать мощность двигателя в соответствии с доступной мощностью источника энергии. На данный момент на квазистационарном плазменной ускорителе продемонстрирован удельный импульс выше 100 км/с для водородной плазмы в режиме однократных импульсов, что позволяет достигнуть целевых показателей прототипа при переходе в частотный режим работы.

## **Целевой результат в 2024 году:**

Прототип плазменного ракетного двигателя на базе магнитоплазменного ускорителя, работающий в импульсно-периодическом режиме.

- мощность тяговая 300 кВт (до 520 кВт электрическая), мгновенная 50 МВт,
- удельный импульс 100 км/с,
- тяга 6 Н,
- расход 60 мг/с
- КПД выше 55% (выше 80% энерговклад в поток),
- диаметр до 50 см,
- ресурс  $5 \cdot 10^7$  Н·с (2400 ч при заданных параметрах потока или  $8,5 \cdot 10^6$  импульсов).

# Устройство ускорителя



## Ускоритель (КСПУ):

- Режим с импульсами длительностью 1 мс
- Квазистационарный режим
- Импульсная подача газа (водород)
- Мгновенная мощность ~ 100 МВт
- Подача газа в межэлектродный зазор
- Ток распределен вдоль катода



# Сравнение с альтернативными проектами разработки мощных плазменных двигателей



Разработчик	Двигатель	Мощность, кВт	Тяга, Н	Удельный импульс, км/с	Диаметр, см	Масса, отношение масса/мощность	Примечания
ГНЦ «Центр Келдыша»	ионный ИД-500	35	0,75	70	60		2000 ч на половинной мощности
РКК «Энергия»	магнито-плазменный Э4916-521	400-500	5	60	50		500 ч с расходом лития до 0,35 г/с, КПД до 50%
SITAEL	магнито-плазменный	200	4	40	25		аргон, магнитное поле до 120 мТ
NASA Glenn Research Center	X3 nested hall thruster (СПД)	100	5,4	26	80	230 кг, целевой показатель – 5 кг/кВт	широко разрабатываются двигатели в 30 кВт, летают до 10 кВт
Ad Astra Rocket	VASIMR VX-200SS (БПРД)	100	3	45	70	порядка 1500 кг, целевой показатель – 2600 кг при 1 МВт, 2 кг/кВт при 30 МВт	сверхпроводящие катушки 100 кВт - 19 мин (80 кВт - 88 часов)
Планируемые характеристики							
ТРИНИТИ	Прототип двигателя на базе ускорителя	520	6	100	менее 50	накопитель – 50-150 кг, двигатель до 100 кг, менее 1 кг/кВт	КПД выше 55% ресурс $5 \cdot 10^7$ Н·с (2400 ч или $8,5 \cdot 10^6$ импульсов) частота импульсов 1 - 20 Гц

# Двигательные параметры

Тяговая мощность (обусловленная кинетической энергией ионов потока) –  
**300 кВт**

Скорость истечения (удельный импульс) – **100 км/с**

$$W_{\text{потока}} = \frac{dm}{dt} \frac{U^2}{2} = \frac{FU}{2}$$

Так, тяга должна составить 6 Н, а массовый расход 60 мг/с.

Для достижения высокой скорости истечения нужно использовать легкие рабочие тела.

$$\eta_{\text{потока}} = \frac{\frac{mU^2}{2}}{\left(\frac{mU^2}{2} + eI + \frac{3}{2}kT\right)} = \frac{52}{52 + 13,7 + 6} = 72\%$$

для **водорода** общая мощность порядка **415 кВт**. По данным полной калориметрии потока на КСПУ, в плазму идёт 80 % энергии. Т.е. ожидаемая вкладываемая электрическая мощность – **520 кВт**. Потери в ускорительной системе – **105 кВт**.

(для гелия энергия иона 208 эВ, энергия ионизации 24 эВ, КПД потока = 87%, общая мощность 345 кВт, вкладываемая электрическая мощность 430 кВт. Потери в ускорительной системе 85 кВт. Т.е. общая мощность снижается на 90 кВт, нагрев двигателя на 20 кВт. Концентрация вещества в 4 раза ниже.)

# Выбор рабочего тела

Повышение массы рабочего тела означает снижение количества вещества, т.е. снижение концентрации носителей заряда. Для двигателей, в которых тяга создается за счет протекания тока через плазму, это может приводить к раннему наступлению «кризиса тока», ограничивая этим мощность двигателя.

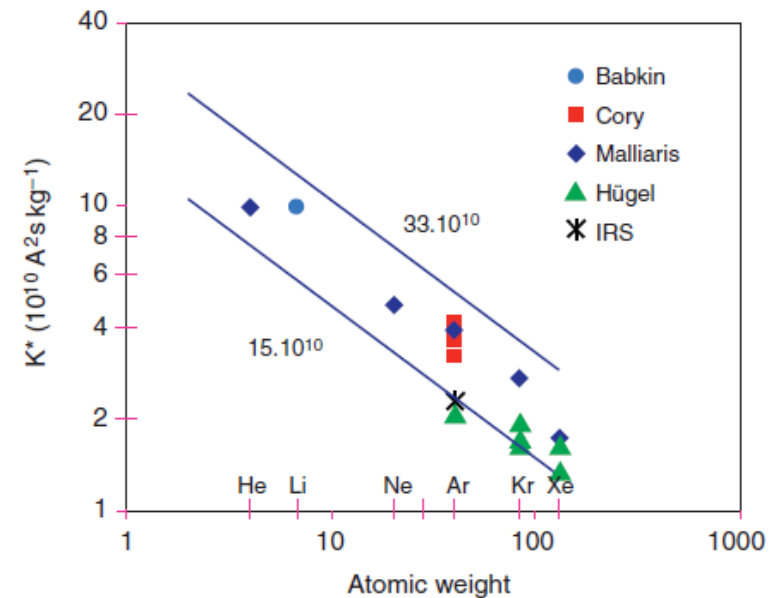
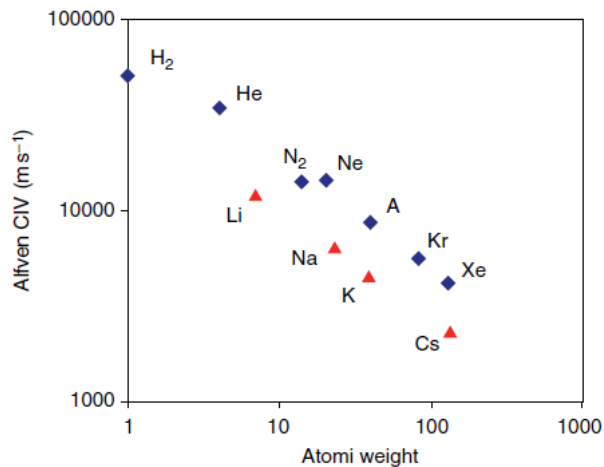
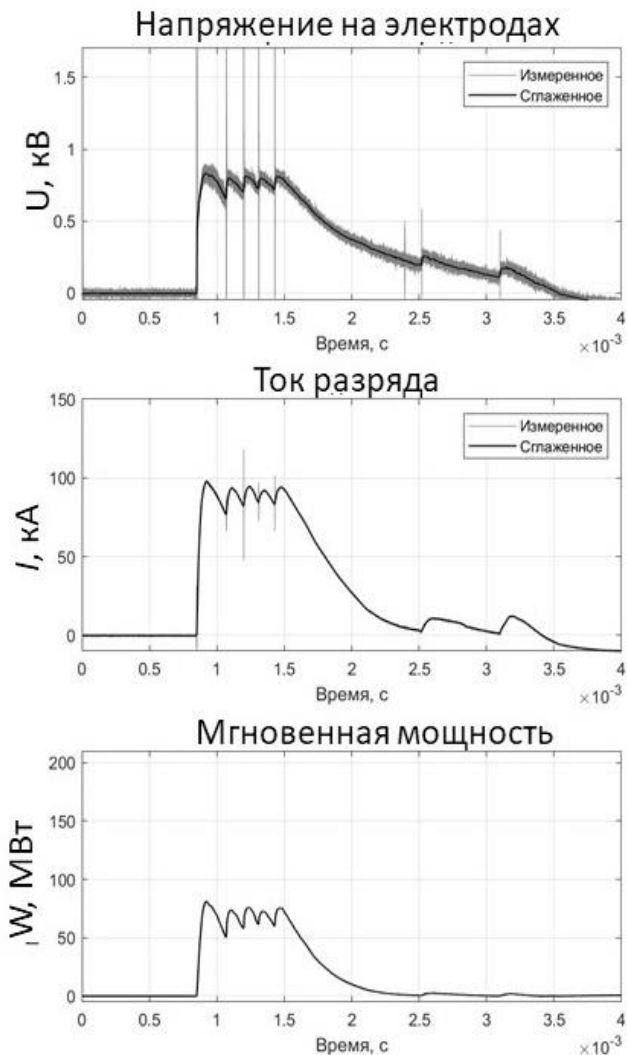
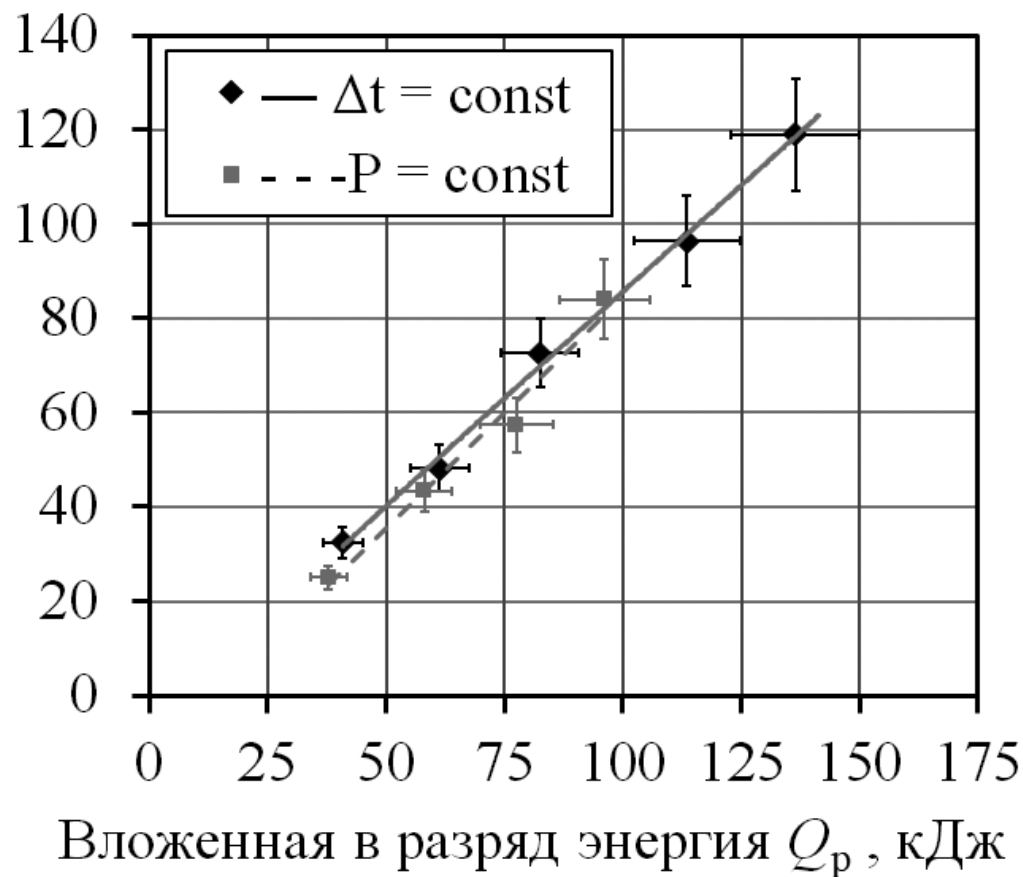


Figure 10. Onset criterion. Reproduced with permission from Hügel (1980) © DFVLR.

# Вклад энергии в разряд



Энергосодержание потока  
плазмы  $Q_{пл}$ , кДж



**КПД энерговклада превышает 80% для энергосодержания выше 50 кДж в импульсе**



## Ускорение плазмы

Ускорение плазмы за счет собственного магнитного поля тока разряда  
Ускорительный режим течения в узком канале (Морозов А.И.)

Максимальная скорость  $V_{max} = \sqrt{2}V_{A0} = \frac{H_0}{\sqrt{2\pi\rho_0}}$

$$V_{max} = \frac{0,04J^2}{\dot{m}} \frac{2f}{r} \frac{1}{3\sqrt{3}}$$

$$\dot{m} = 2\pi r f \frac{\sqrt{2}}{3\sqrt{3}\pi} H_0 \sqrt{\rho_0}$$

$$U \sim J^3 / \dot{m}$$

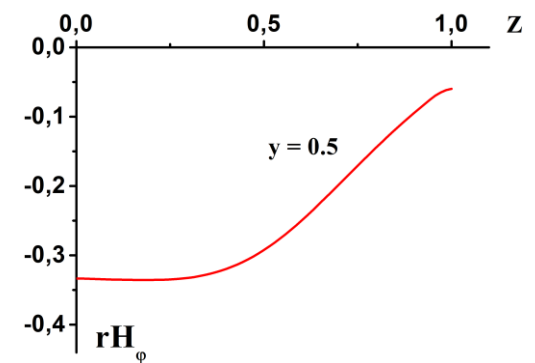
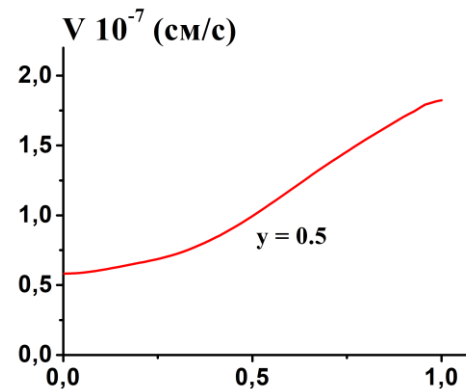
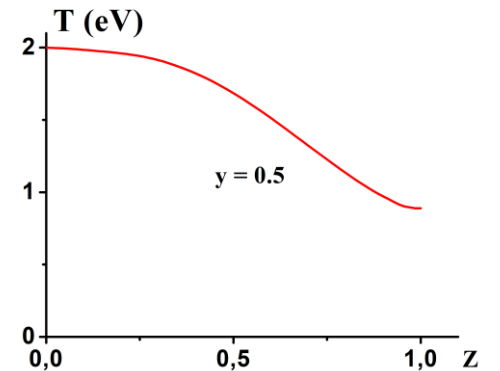
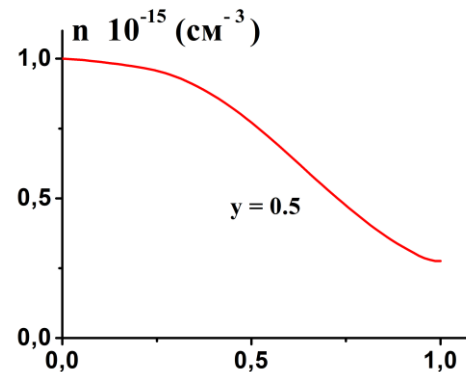
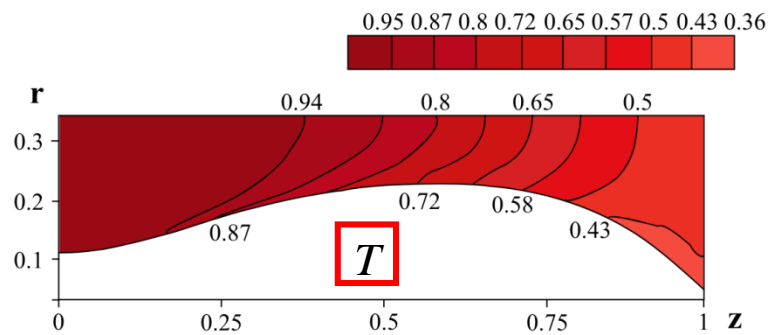
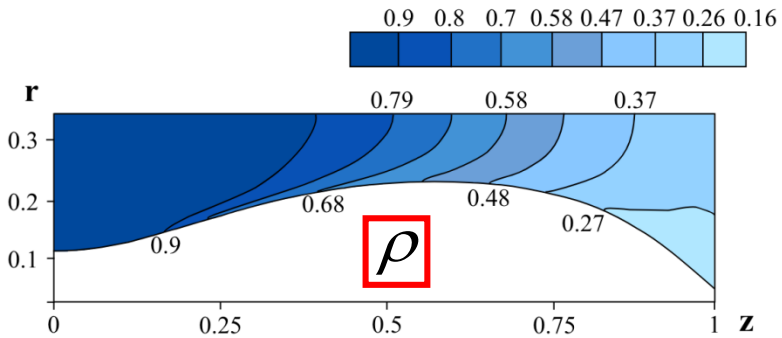
$f$  - ширина канала

$r$  – средний радиус

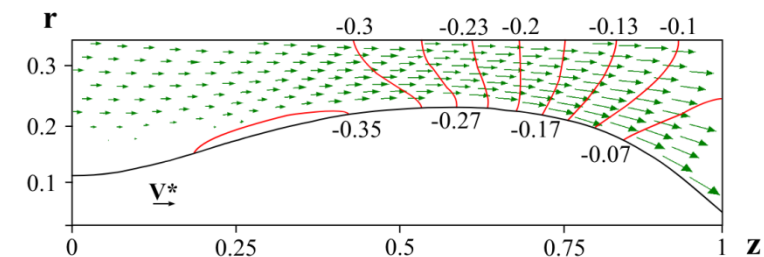
$U$  – напряжение на разряде

# Численное моделирование режимов ускорения плазменного потока (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН)

Квазистационарное течение в профилированном канале при условии равномерной подачи на входе.



Векторное поле скоростей и ток в плазме



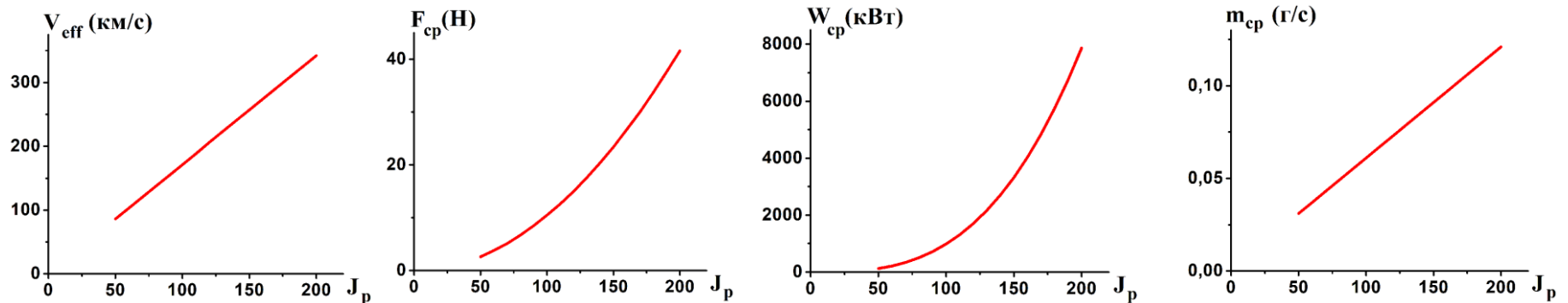
$$J_p = 100 \text{ кА}, \quad T_0 = 2 \text{ эВ}, \quad n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}, \quad L = 60 \text{ см}, \quad R_0 = 20 \text{ см}$$

**Выбрана геометрия электродов**

# Численное моделирование режимов ускорения плазменного потока (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН)

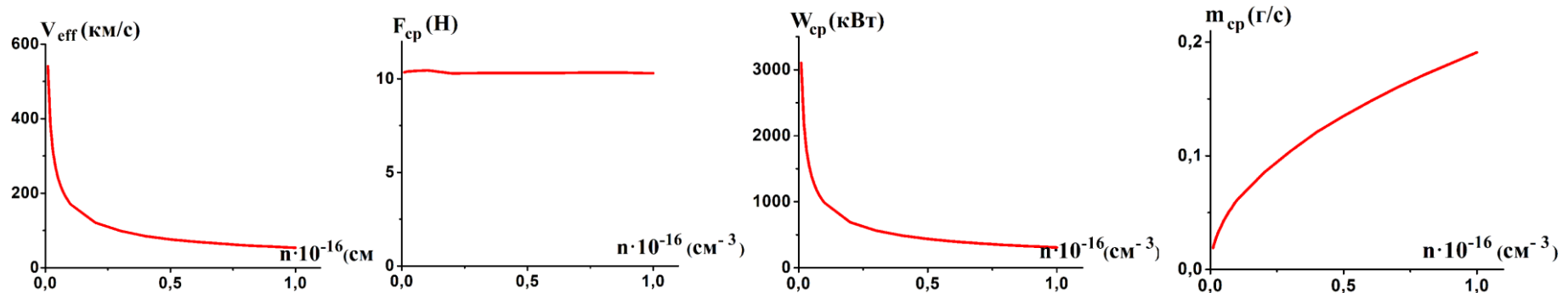
Зависимость от тока разряда.

$$n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}, \quad T_0 = 2 \text{ эВ}, \quad L = 60 \text{ см}, \quad R_0 = 20 \text{ см}$$



Зависимость от концентрации.

$$L = 60 \text{ см}, \quad R_0 = 20 \text{ см}, \quad J_p = 100 \text{ кА}, \quad T_0 = 2 \text{ эВ}$$



**Варьируя ток разряда и расход можно выбрать нужную рабочую точку**

## Определение параметров импульсов

Определены зависимости для связи характеристик на выходе с исходной концентрацией и током разряда:

$$W \sim \frac{1}{\sqrt{n}}, \quad V_{eff} \sim \frac{1}{\sqrt{n}}, \quad \dot{m} \sim n^{0,6}$$

$$W \sim J_p^3, \quad V_{eff} \sim J_p, \quad \dot{m} \sim J_p$$

Интегральные характеристики: массовый расход 60 мг/с, тяга 6 Н, мощность 300 кВт

Если делать импульсы частотой **10 Гц по 1 мс**, то нужно иметь мгновенную мощность 30 МВт, тягу 0,6 кН, массовый расход 6 г/с.

Параметры ускорительной ступени (в моделировании для длительности 0,7 мс):

**ток 73 кА, концентрация на входе  $1,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$**

**Суммарный заряд за импульс – 51 Кулон, энергия 42 кДж.**

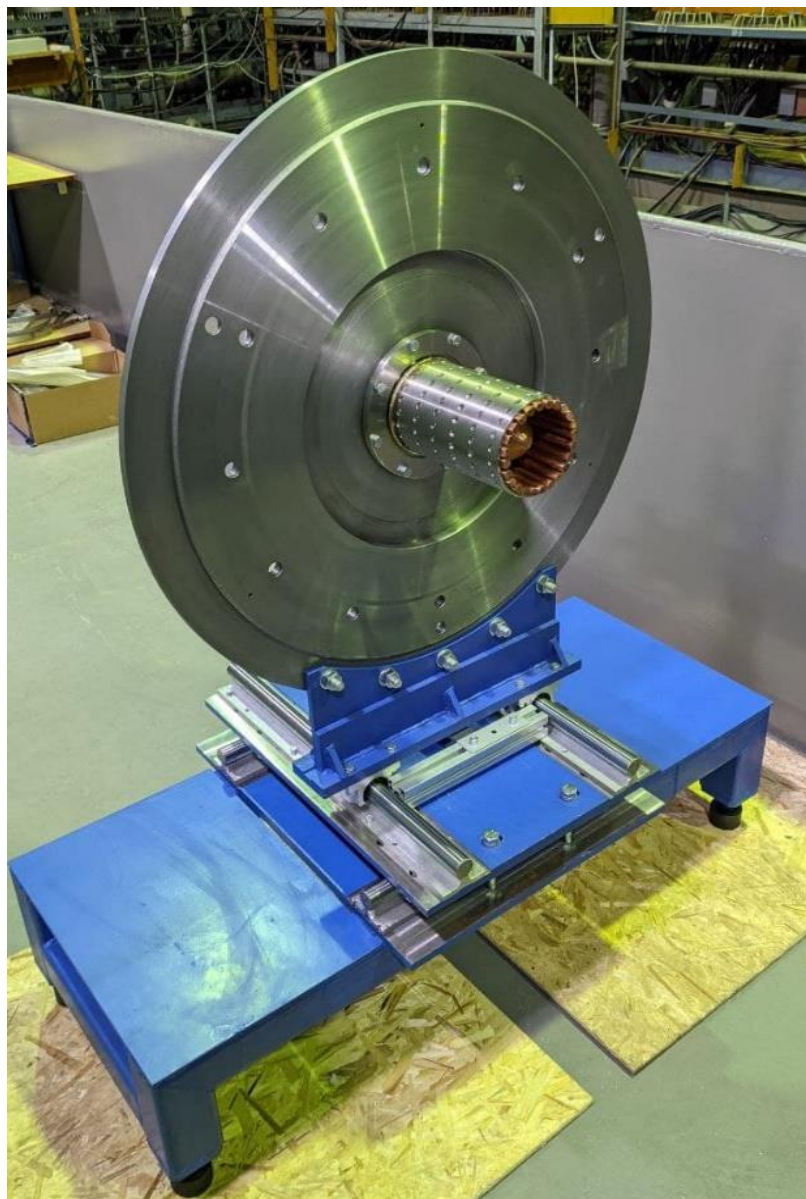
Современные конденсаторы достигают значения удельной запасаемой энергии 1 кДж/кг. Масса батареи может быть **до 50 кг**.

Увеличение энергии в импульсе повлечет необходимость пропорционального увеличения массы батареи.

## Новый ускоритель плазмы с высоким удельным импульсом



ТРИНИТИ  
РОСАТОМ



*Создан ускоритель плазмы,  
ориентированный на максимально  
полное использование рабочего тела*

- *Геометрия электродов*
- *Короткий напуск газа*
- *Согласование импульса тока*

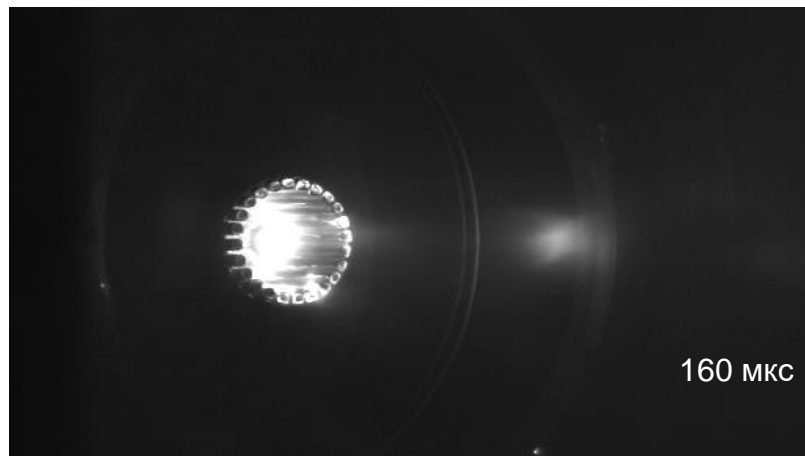
## **Новый ускоритель плазмы с высоким удельным импульсом**



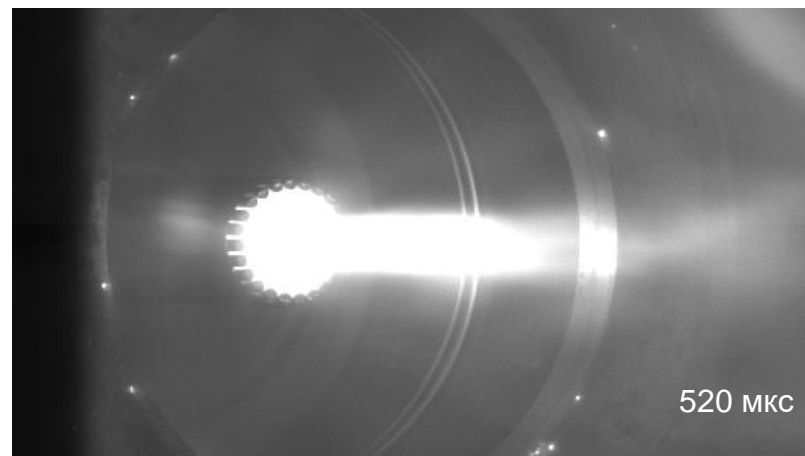
ТРИНИТИ  
РОСАТОМ

*Ускоритель установлен в ресивер увеличенного объема с использованием специальной системы крепления для измерения тяги.*

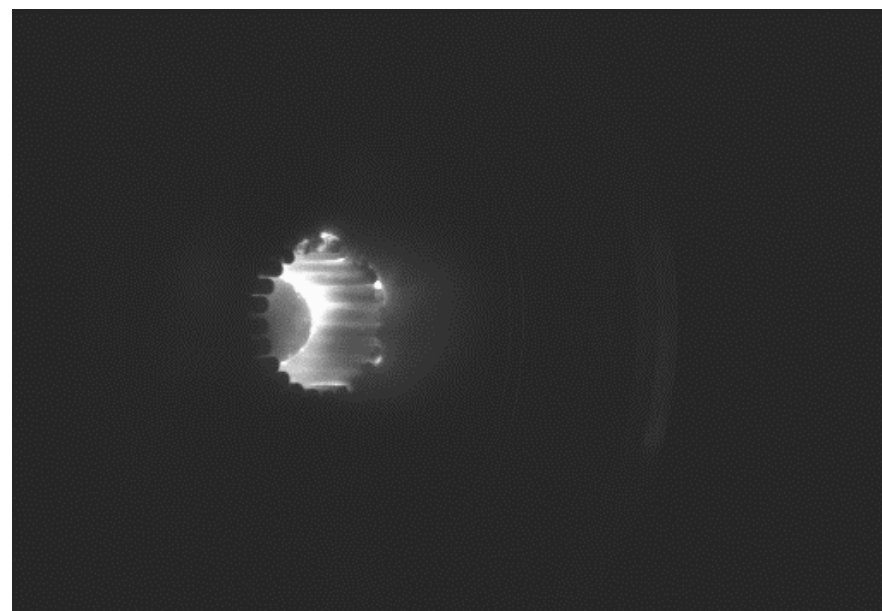




160 мкс



520 мкс

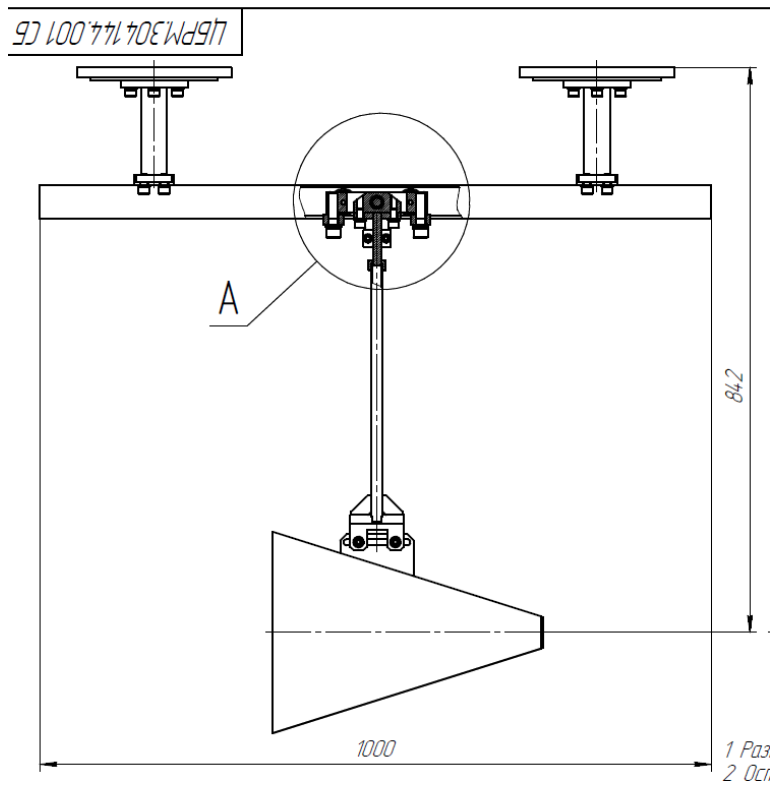


*Поток плазмы из ускорителя*

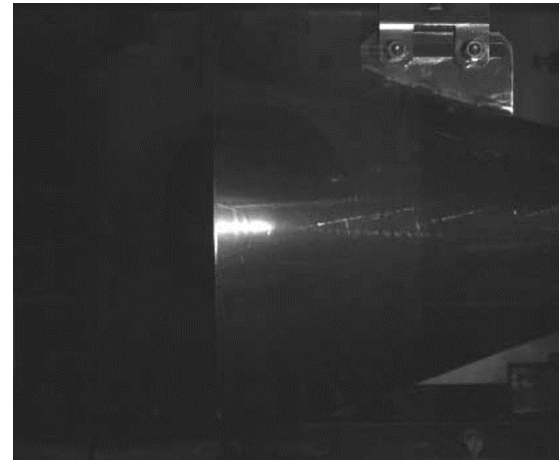
# Измерение полного импульса баллистическим маятником



ТРИНИТИ  
РОСАТОМ



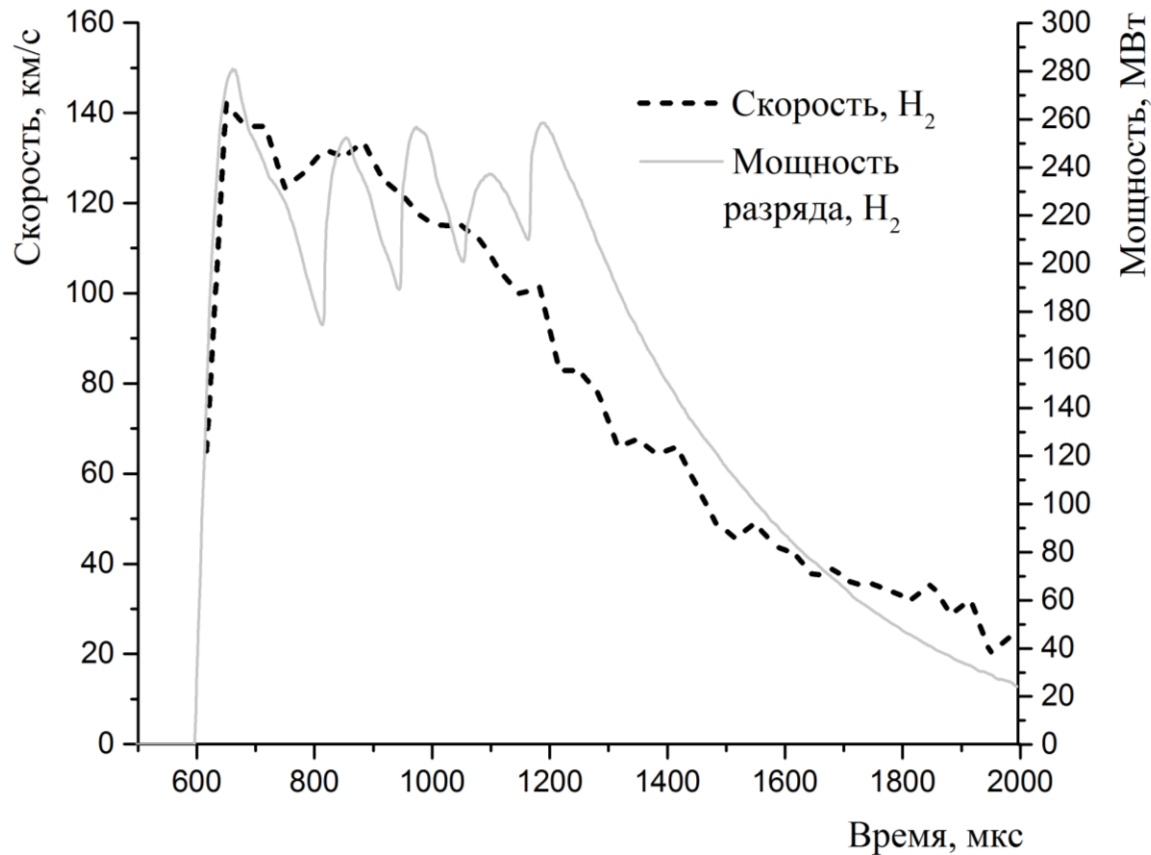
Масса маятника 3 кг





# Скорость истечения и мощность разряда для водорода

Определение скорости методом регистрации доплеровского сдвига линии излучения примеси гелия

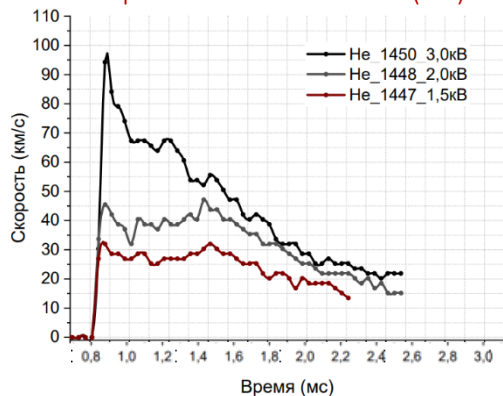


Удельный импульс 117 км/с при средней мощности 236 МВт и длительности 630 мкс.

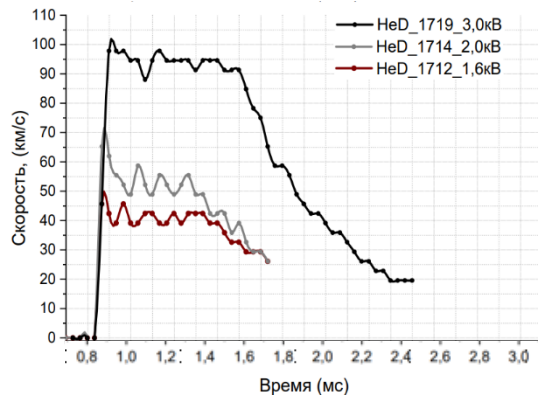
Полный энерговклад 148 кДж, энергосодержание потока 89 кДж. Средняя сила тяги 2,4 кН.

# Данные по скорости для различных газов

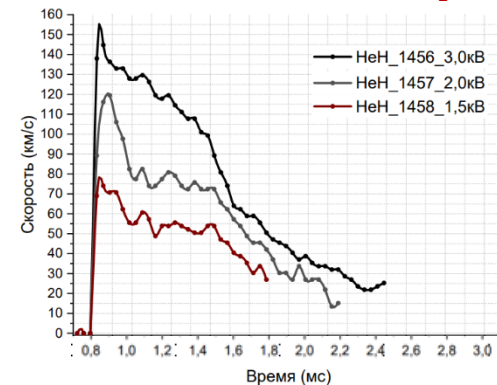
### Скорость потока плазмы (He)



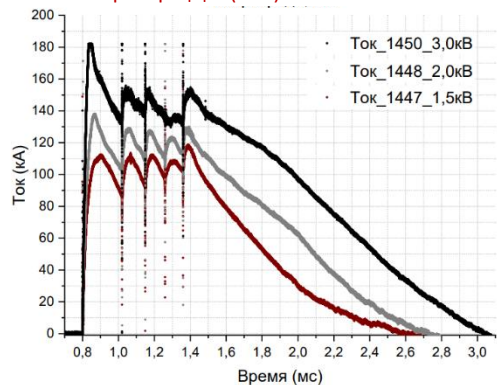
### Скорость потока плазмы (D<sub>2</sub>+10%He)



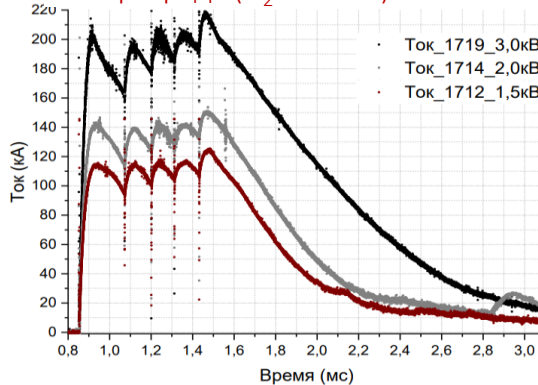
### Скорость потока плазмы (H<sub>2</sub>+10%He)



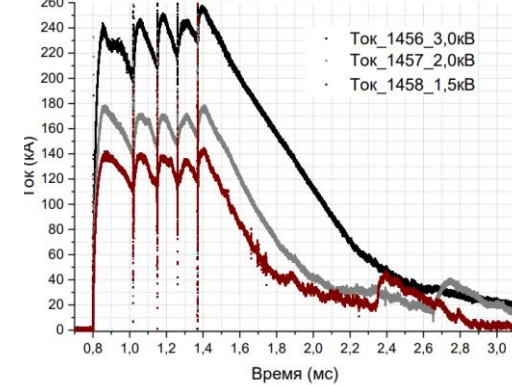
### Ток разряда (He)



### Ток разряда (D<sub>2</sub>+10%He)

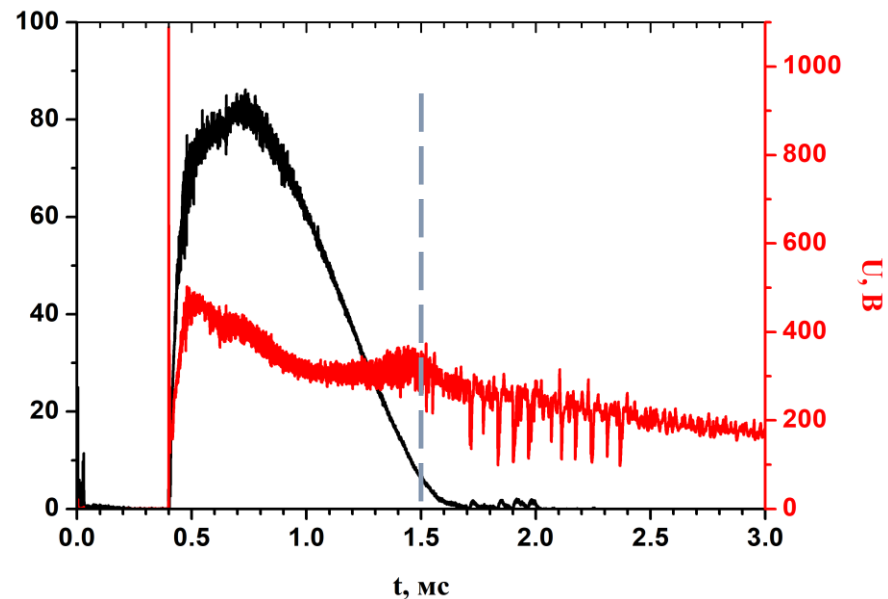
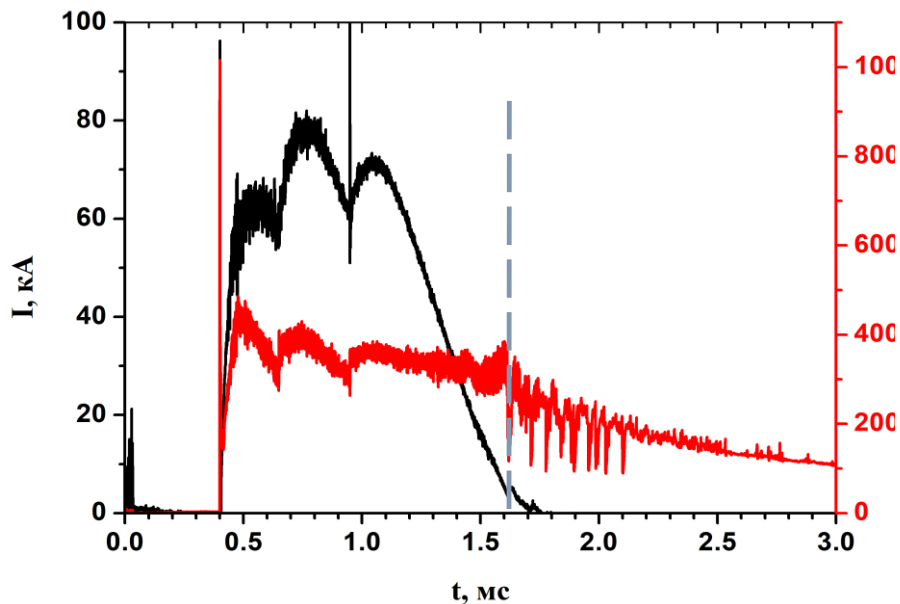


### Ток разряда (H<sub>2</sub>+10%He)



С увеличением массы рабочего тела снижается энергосодержание в разряде и скорость истечения

# Оптимизация длительности и энергосодержания плазменного импульса



Завершение импульса тока, поскольку закончилось поступление рабочего тела – полное использование газа

Получен режим с однократной коммутацией батареи

# Полученный результат



Создан новый ускоритель и впервые показано получение удельного импульса свыше 100 км/с в такой системе.

Проведены исследования длительности и энергосодержания импульса при варьировании: расхода газа от 1,5 до 10 мг за импульс; длительности импульсов газа 600 – 900 мкс и напряжения 500 – 1300 мкс; напряжения разряда 1,2 – 3 кВ. Длительность импульса плазмы определяется длительностью напуска газа клапаном.

Во всех вариантах расхода и длительности возможно реализовать поток водорода с удельным импульсом выше 100 км/с при соответствующем повышении энергосодержания от 20 до 90 кДж. (можно реализовать среднюю мощность в 300 кВт при работе с частотой 4 – 15 Гц в зависимости от энергосодержания импульса)

# Результаты работ 2020-2021 и планы 2022-2024



ТРИНИТИ  
РОСАТОМ

Кардинально обновлена диагностическая база

- Высокоскоростная съемка (поток, число Маха, диагностики)
- Спектроскопия (высокоскоростная)
- Интерферометрия – кадровая и многохордовая
- Динамика излучения
- Датчики давления и силы
- Зонды

В однократном импульсе продемонстрирована достижимость целевых параметров двигателя.

Создан ускоритель плазмы, включая системы напуска газа, модернизирована установка, отрабатываются решения для испытательного стенда (коммутация, криогенная откачка).

2022-2023

Демонстрация ресурса электродной системы

- Оптимизация параметров импульсов – согласование подачи газа, коммутации тока, режима работы источника питания
- Двухступенчатый ускоритель – разделение ионизации и ускорения, контроль приэлектродных процессов
- Ускоритель с внешним магнитным полем – распределение плотности тока по катоду
- Имитационные ресурсные испытания.

2023-2024

*Прототип плазменного ракетного двигателя, работающий в импульсно-периодическом режиме с мощностью не ниже 300 кВт.*

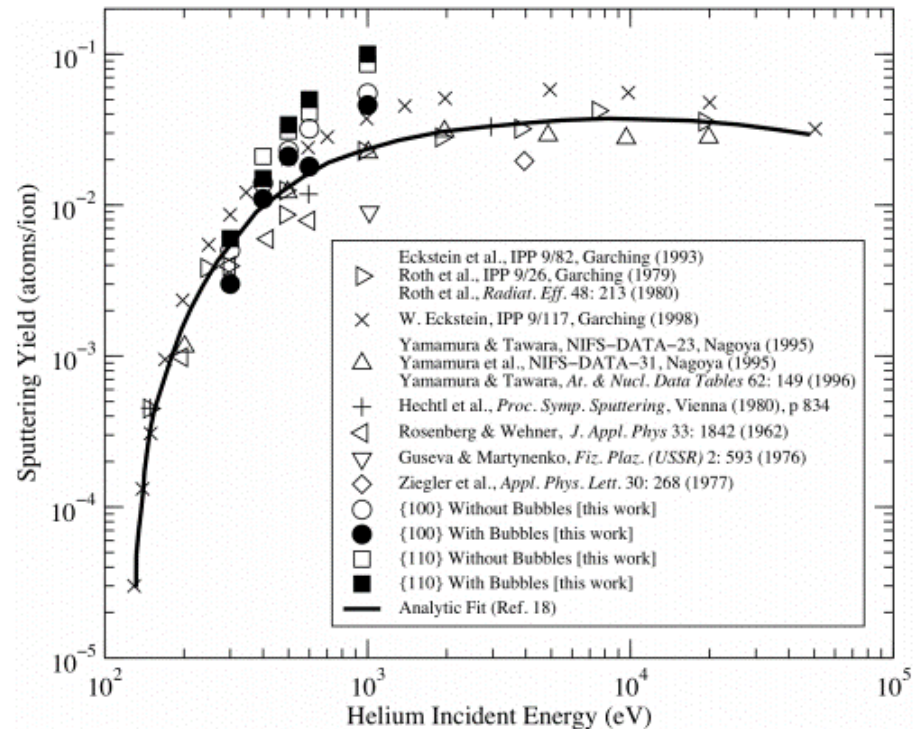
# Ожидаемая нагрузка на катод

Ожидается работа в «щадящем» режиме по сравнению с текущей эксплуатацией КСПУ

При равномерном распределении тока нагрузка в импульсе 1,7 кА/см

Средняя плотность мощности 33 Вт/см<sup>2</sup>, в импульсе 3,3 кВт/см<sup>2</sup>

Распыление вольфрама гелием за 2400 часов - до 5 мг/см<sup>2</sup>



## Ожидаемая нагрузка на катод



Геометрия электродов: длина 60 см, радиус анода 20 см. Общий ток 100 кА. Расчетные выходные параметры: скорость 100 км/с, мощность в потоке 300 кВт, импульсы по 1 мс частотой 10 Гц.

Плотность тока на катоде: максимум  $60 \text{ A/cm}^2$  в сужающейся части вблизи выхода сопла. Для режима ионного токопереноса можно считать распыление потоком протонов с энергией 50 эВ и плотностью  $60 \text{ A/cm}^2$ . Плотность мощности  $3,8 \text{ кВт/cm}^2$ .

*(По оценке из концентрации плазмы энергия протонов на катоде около 0,9 эВ. При такой оценке плотность мощности  $0,9 \text{ кВт/cm}^2$ .)*

При коэффициенте распыления  $10^{-4}$  атомов/ион (200 эВ) для 2400 часов или 5,2 МКл, будем иметь  $3,24 \cdot 10^{21}$  атомов/ $\text{cm}^2$ , что для вольфрама  $984 \text{ мг/cm}^2$  или **0,5 мм ухода материала** (для молибдена  $516 \text{ мг/cm}^2$  или **0,5 мм**).

# Спасибо за внимание

**Гуторов Константин Михайлович**  
Руководитель проекта

Моб. тел.: +7 (916) 610 80 29  
E-mail: [gutorovkm@triniti.ru](mailto:gutorovkm@triniti.ru)  
[www.triniti.ru](http://www.triniti.ru)

**30.03.2022**

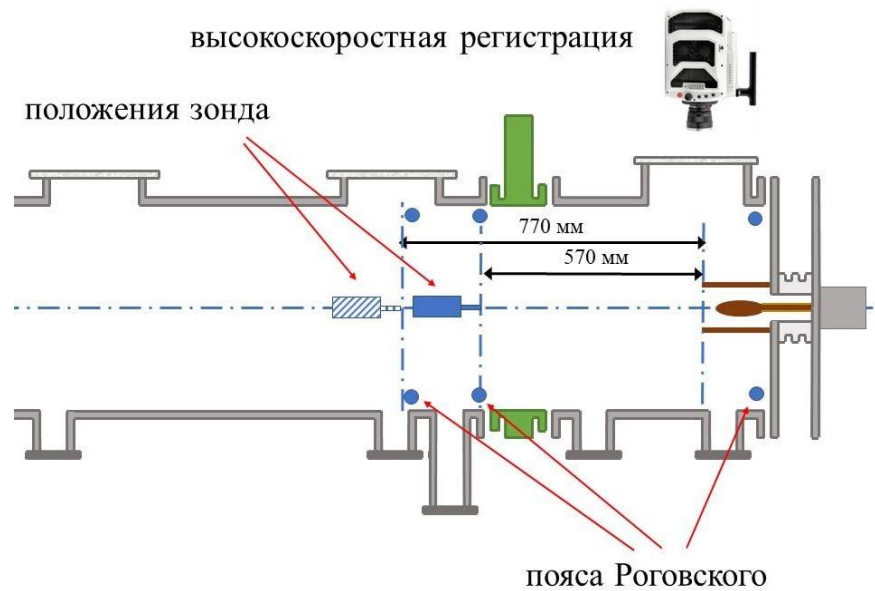
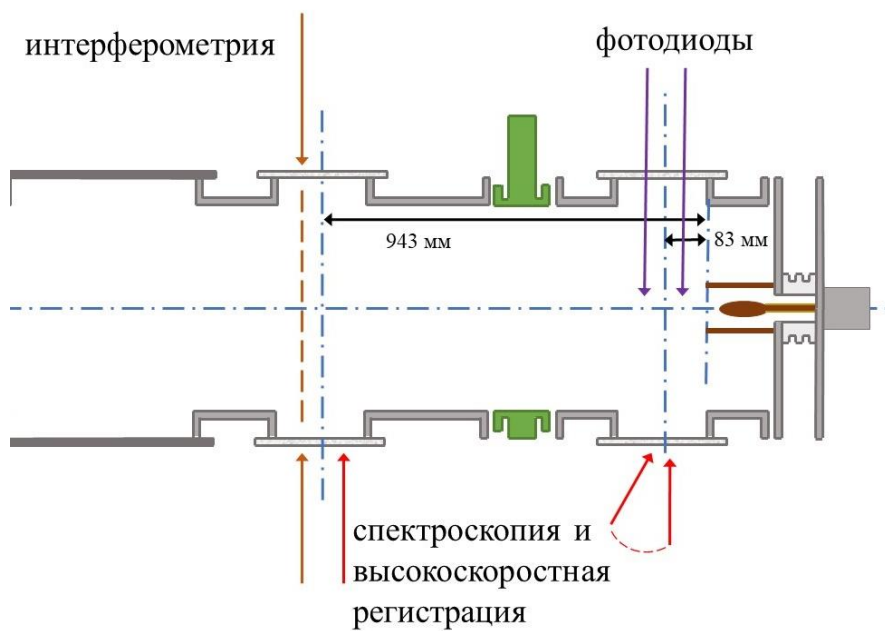
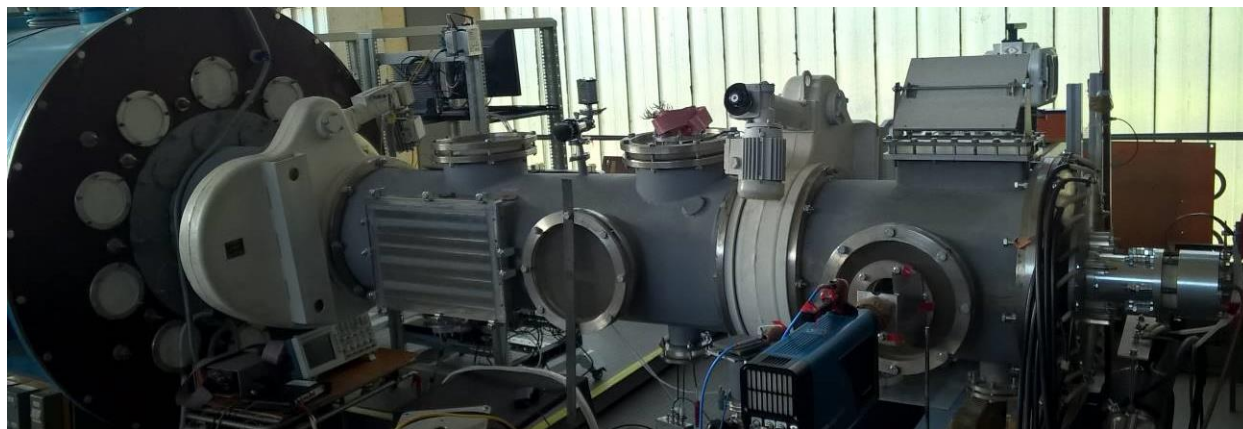




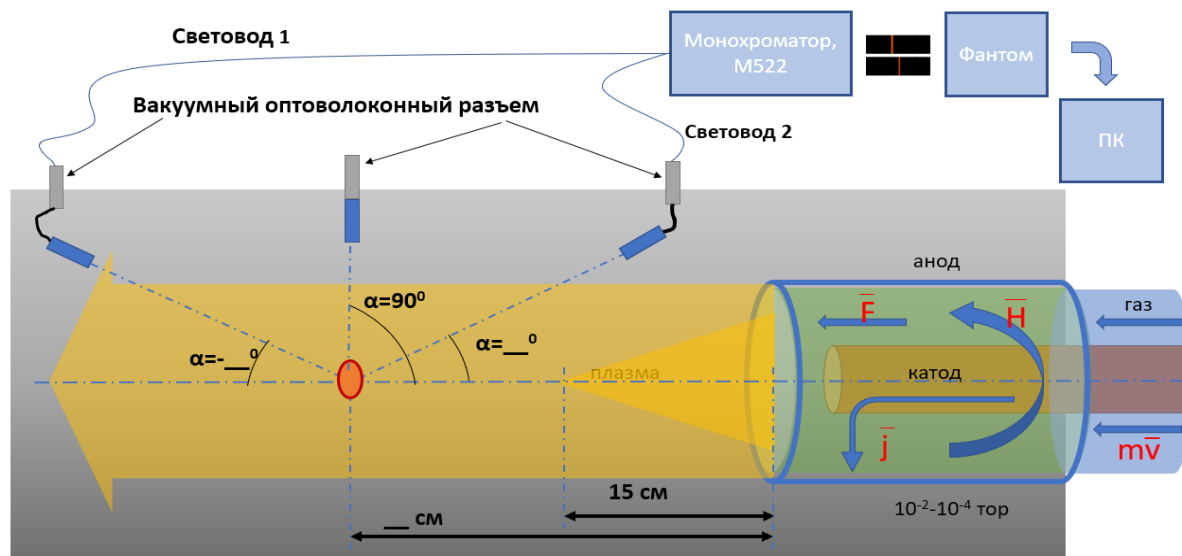
# Дополнительные данные по диагностикам

- Высокоскоростная съемка
- Спектроскопия
- Интерферометрия
- Динамика излучения
- Число Маха
- Зонды
- Напуск газа

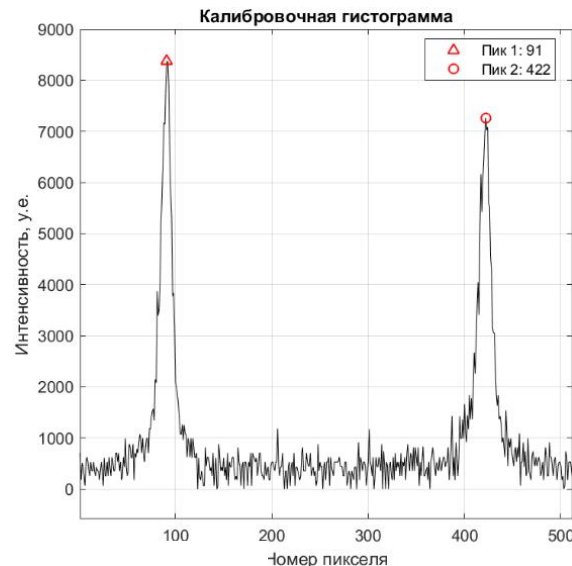
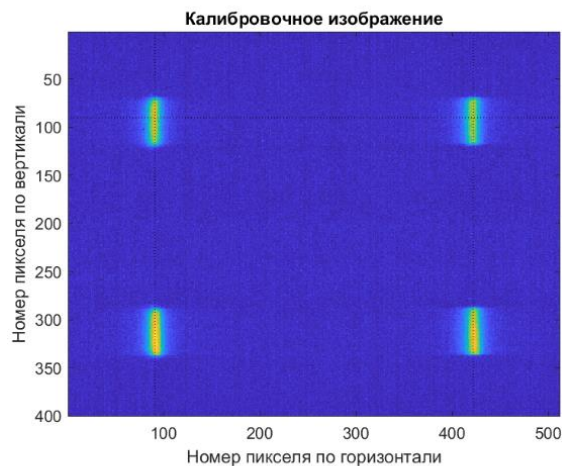
## КСПУ-Т



# Определение скорости плазменного потока по доплеровскому сдвигу

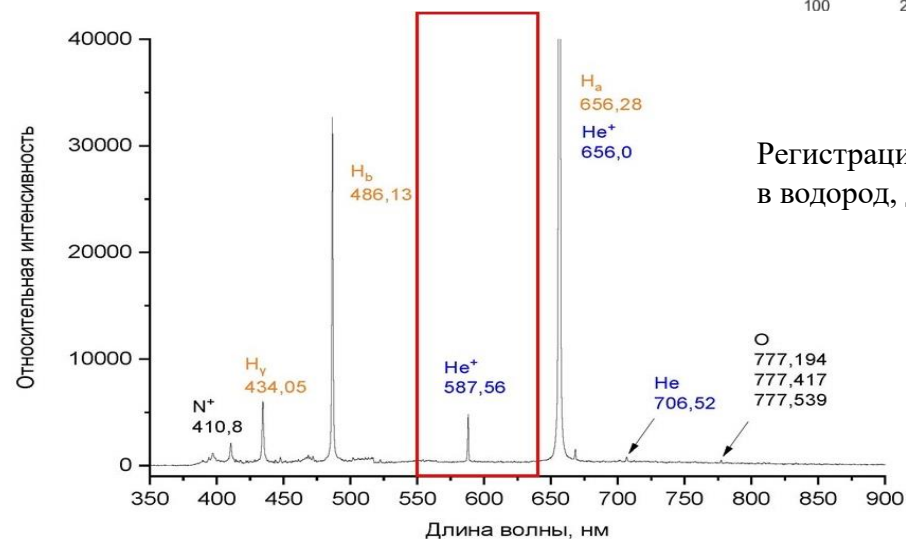


# Определение скорости плазменного потока по доплеровскому сдвигу



Дисперсия 0,0064 нм/рх (156,8 рх/нм)

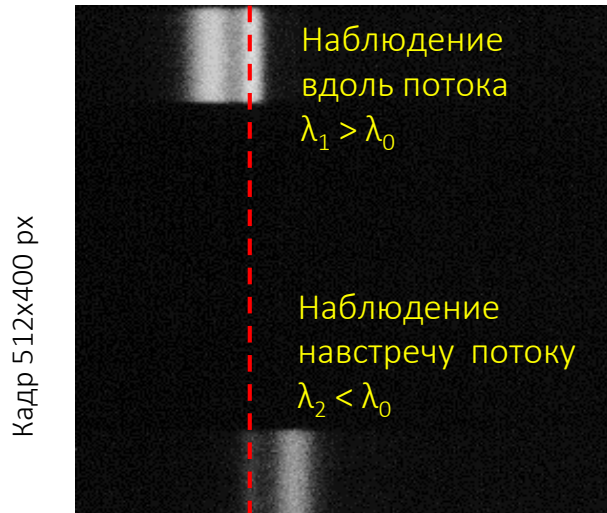
Скорость, км/с	Смещение, нм	Смещение, рх
5	0,019	2,88
10	0,038	5,76
50	0,188	28,78
100	0,376	57,56
150	0,564	86,35
200	0,752	115,13



Регистрация по линии гелия 587,56 нм,  
в водород, дейтерий и аргон добавлялся как маркер

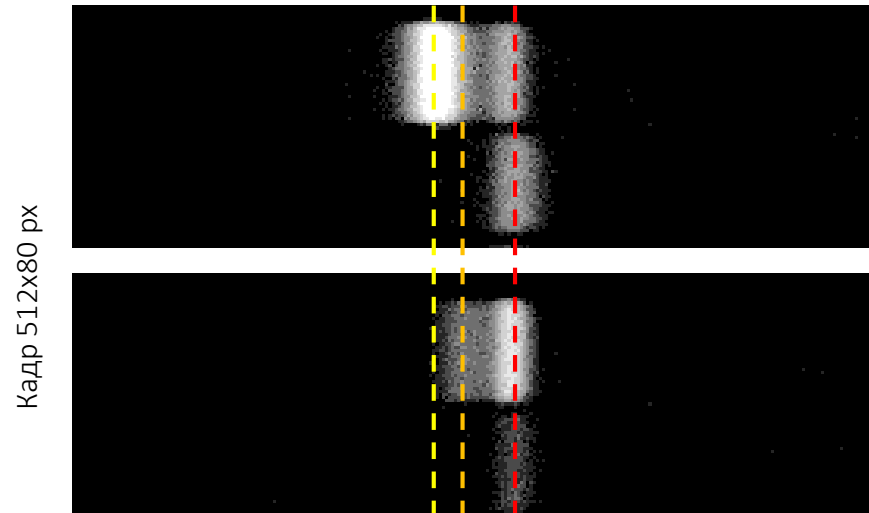
# Определение скорости плазменного потока по доплеровскому сдвигу

Эксперимент с наблюдением по потоку и **навстречу** потоку



Частота съемки  $(30 - 100) \cdot 10^3$  кадр/с

Эксперимент с наблюдением по потоку и **перпендикулярно** потоку



период 33 – 10 мкс/кадр

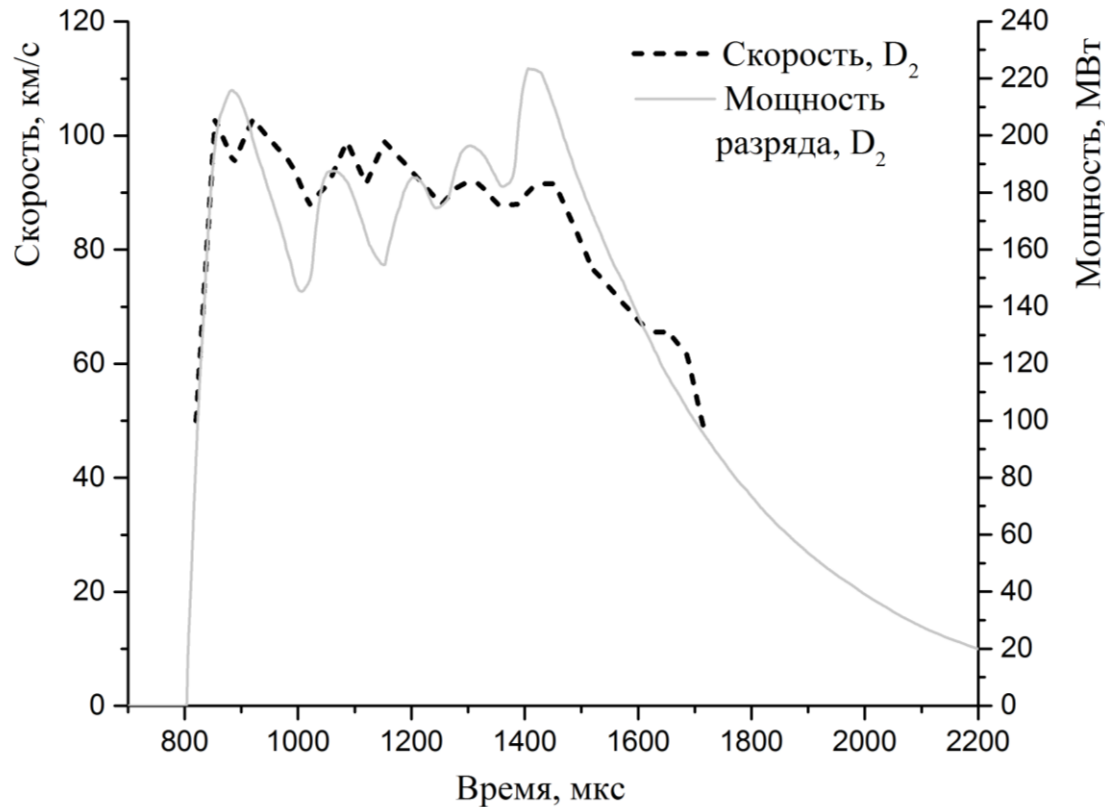
Экспозиция 1-33 мкс/кадр

# Разработка, изготовление и испытание ускорителя плазмы с удельным импульсом не менее 100 км/с.



ТРИНИТИ  
РОСАТОМ

## Испытание - дейтерий



Значение удельного импульса составило 86 км/с при средней мощности 171 МВт и длительности 900 мкс. Полный энерговклад 154 кДж, энергосодержание потока 100 кДж. Средняя сила тяги 2,6 кН.

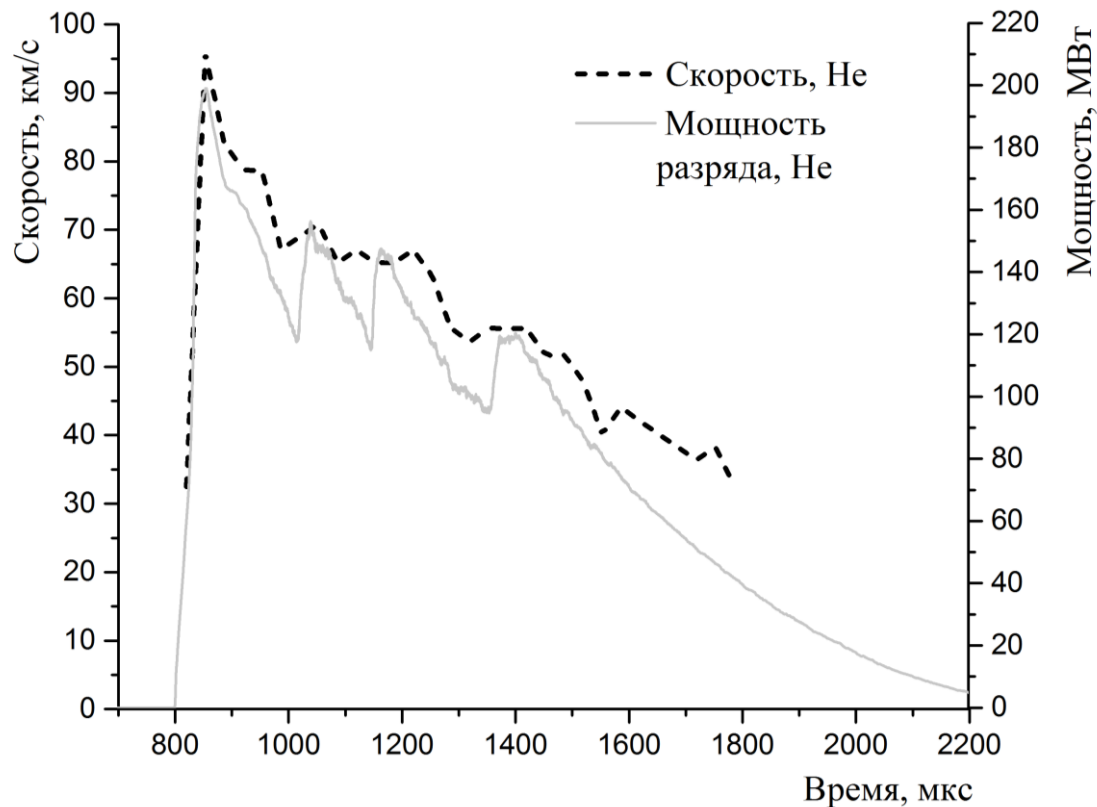
Наблюдается истечение с наиболее равномерным распределением скорости во время импульса.

# Разработка, изготовление и испытание ускорителя плазмы с удельным импульсом не менее 100 км/с.



ТРИНИТИ  
РОСАТОМ

## Испытание - гелий



Значение удельного импульса составило 63 км/с при средней мощности 127 МВт и длительности 700 мкс. Полный энерговклад 89 кДж, энергосодержание потока 54 кДж. Средняя сила тяги 2,5 кН.

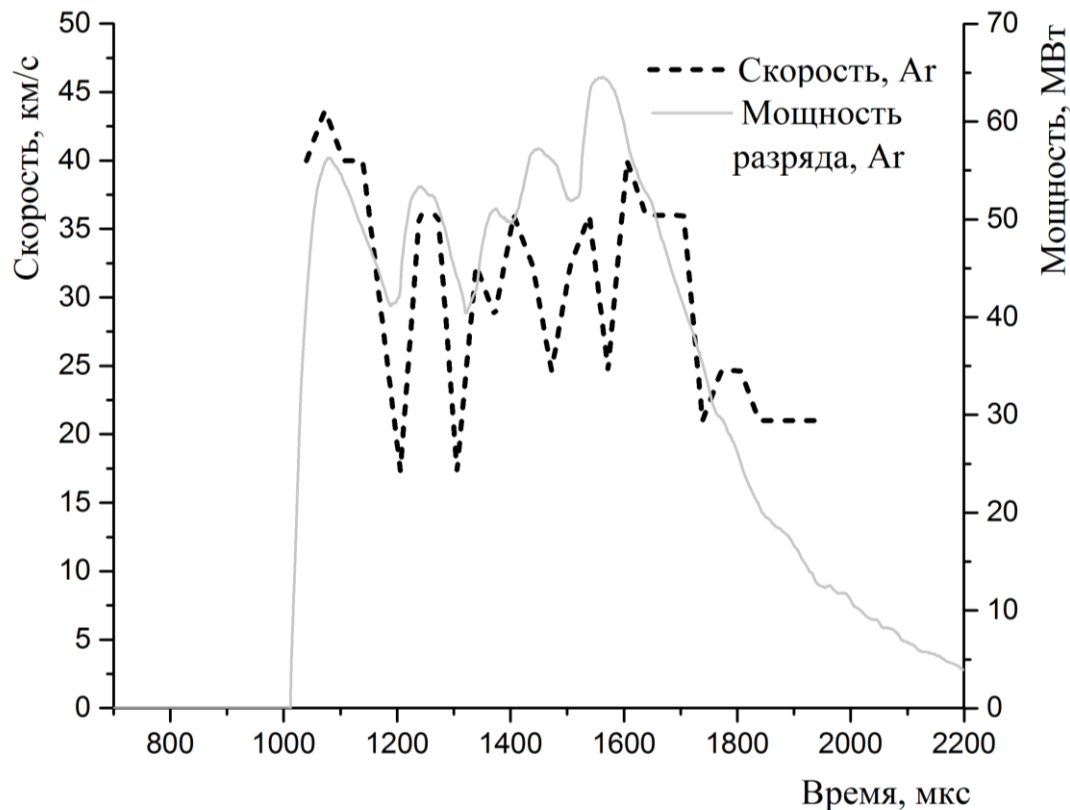
Наблюдается спад скорости потока во время импульса.

# Разработка, изготовление и испытание ускорителя плазмы с удельным импульсом не менее 100 км/с.



ТРИНИТИ  
РОСАТОМ

## Испытание - аргон



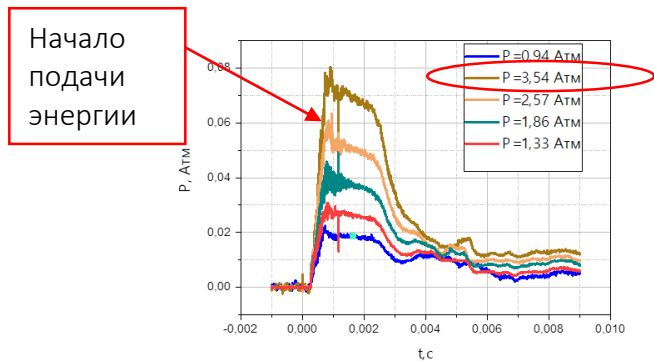
Значение удельного импульса составило 32 км/с при средней мощности 57 МВт и длительности 700 мкс. Полный энерговклад 40 кДж, энергосодержание потока 26 кДж. Средняя сила тяги 2,3 кН.

Разряд на аргоне с неустойчивостями и провалами в скорости.

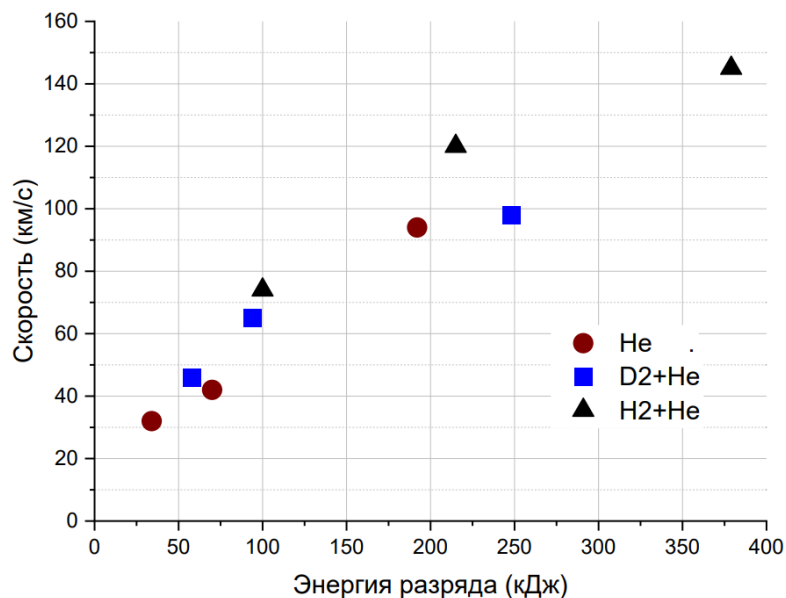


# Данные по скорости для различных газов

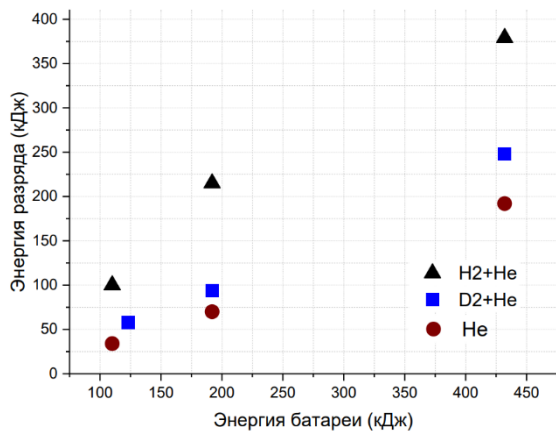
## Динамическое давление потока газа (H2)

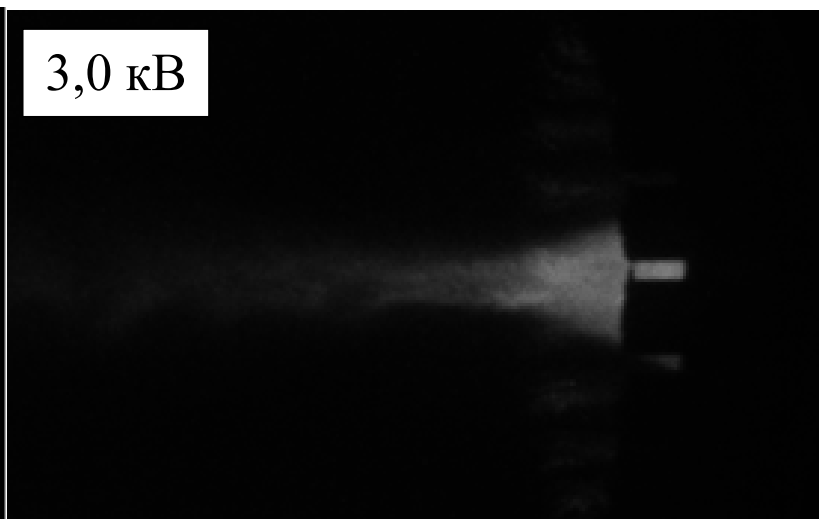
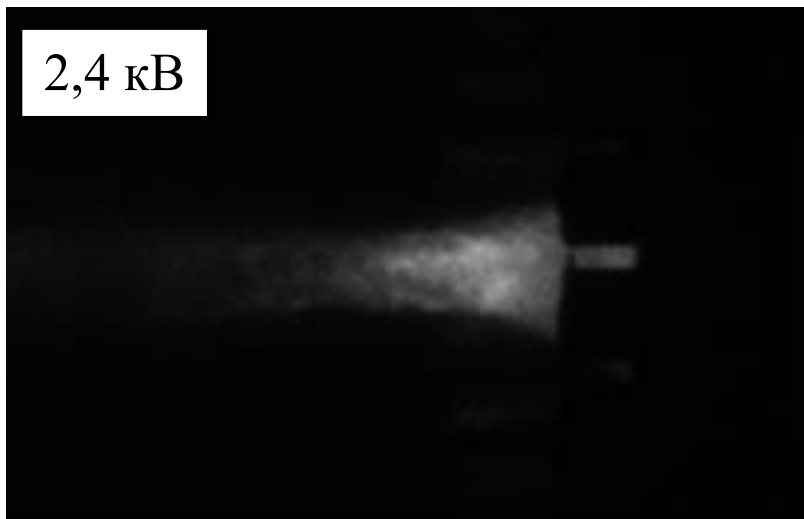
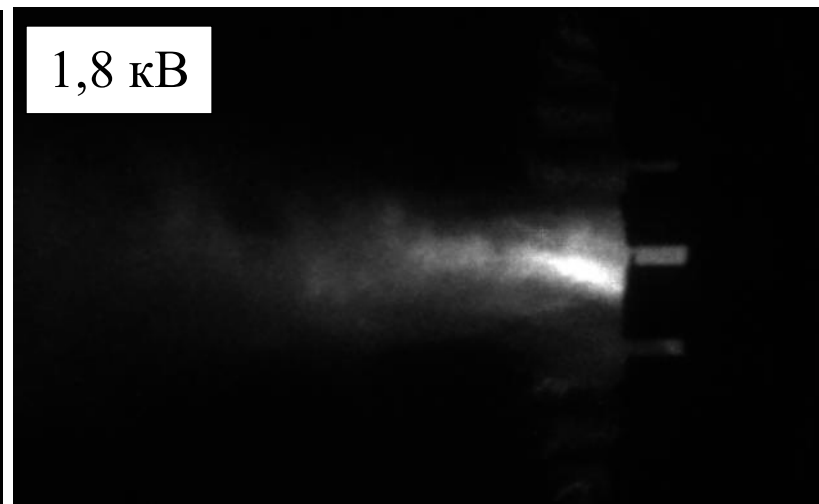
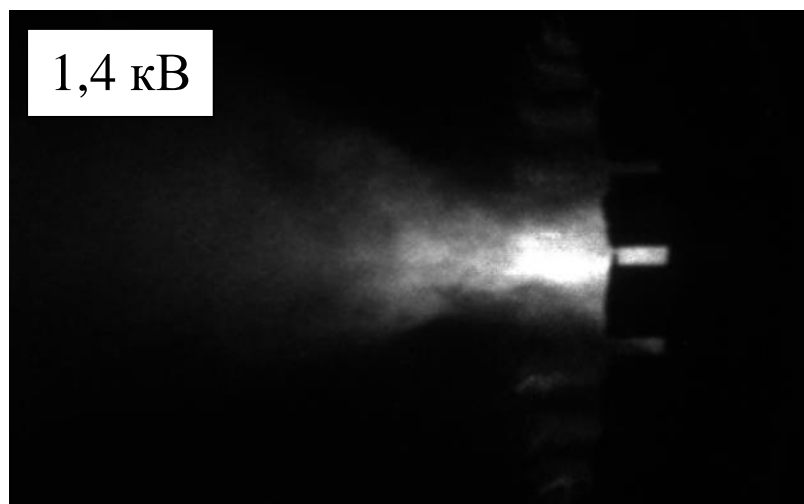


## Скорость потока для рабочих газов с разной а.е.м.

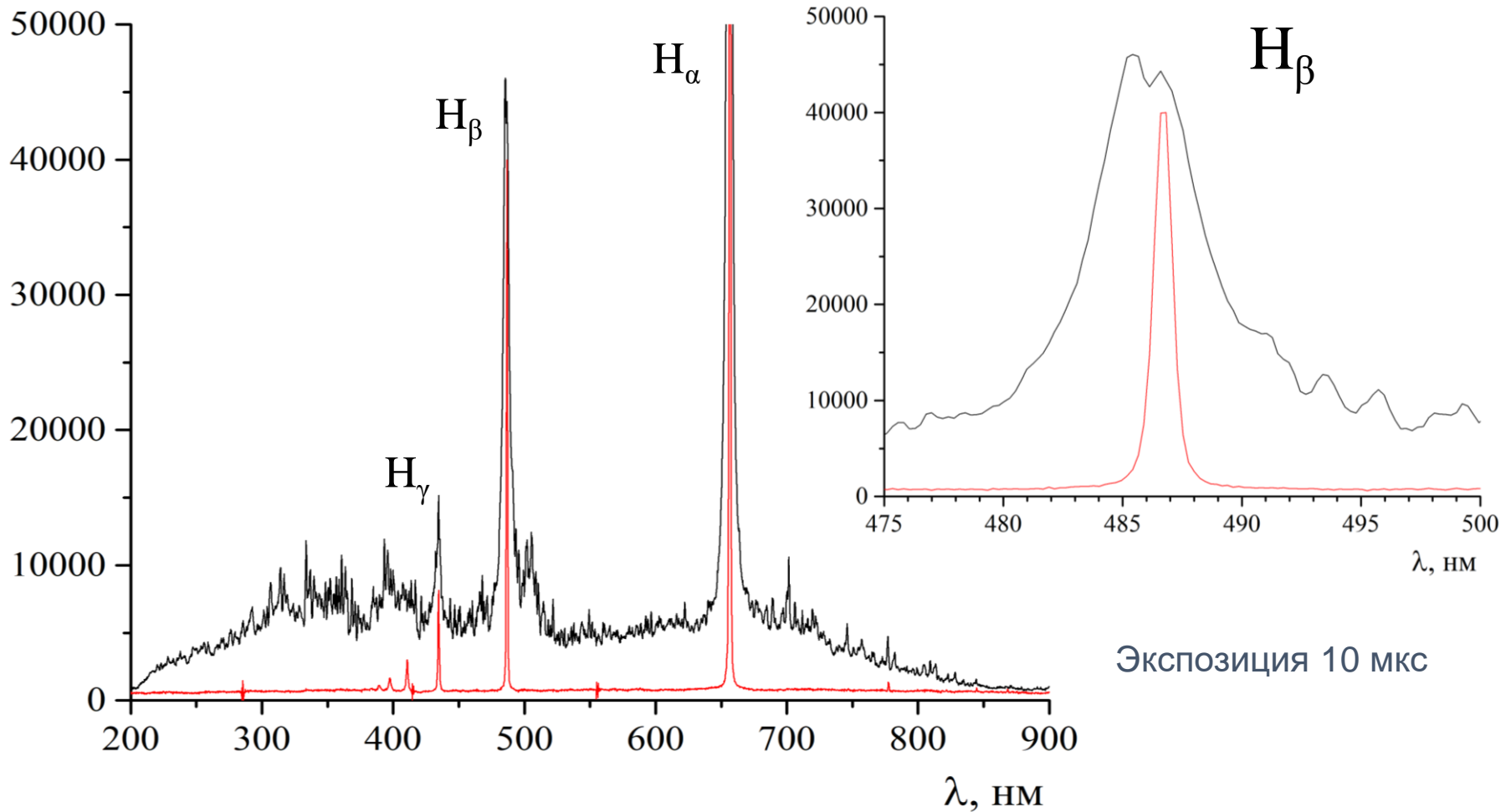


## Энергетические характеристики разряда для рабочих газов с разной а.е.м.



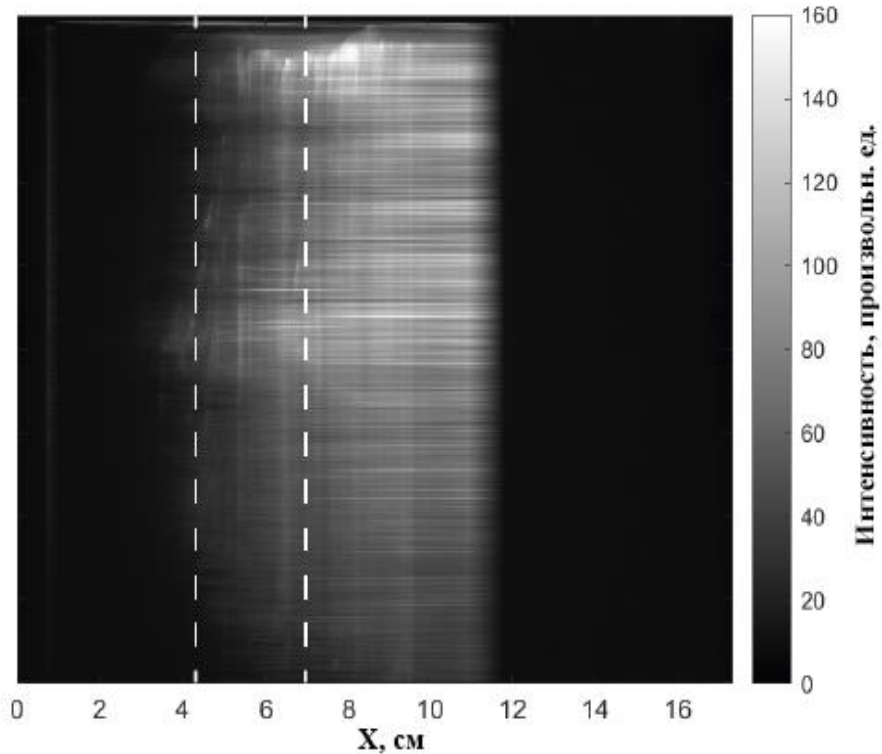
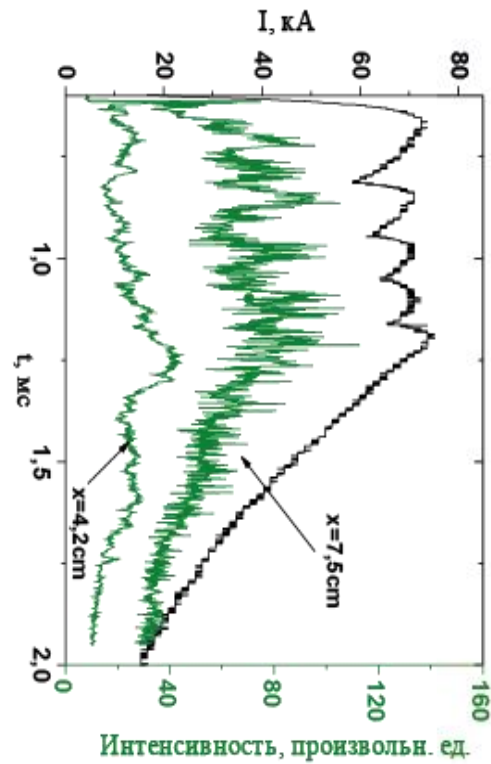


Экспозиция 60 нс, поток стабилен при напряжениях выше 2 кВ

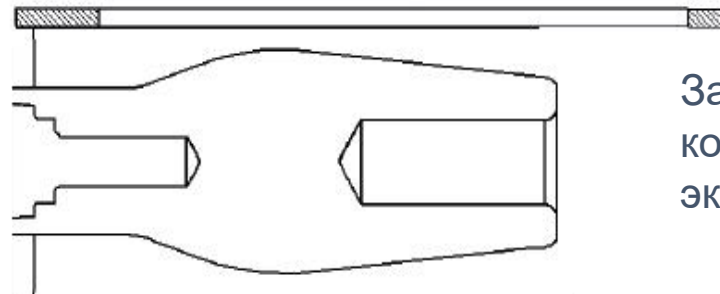


свечение потока – серия Бальмера

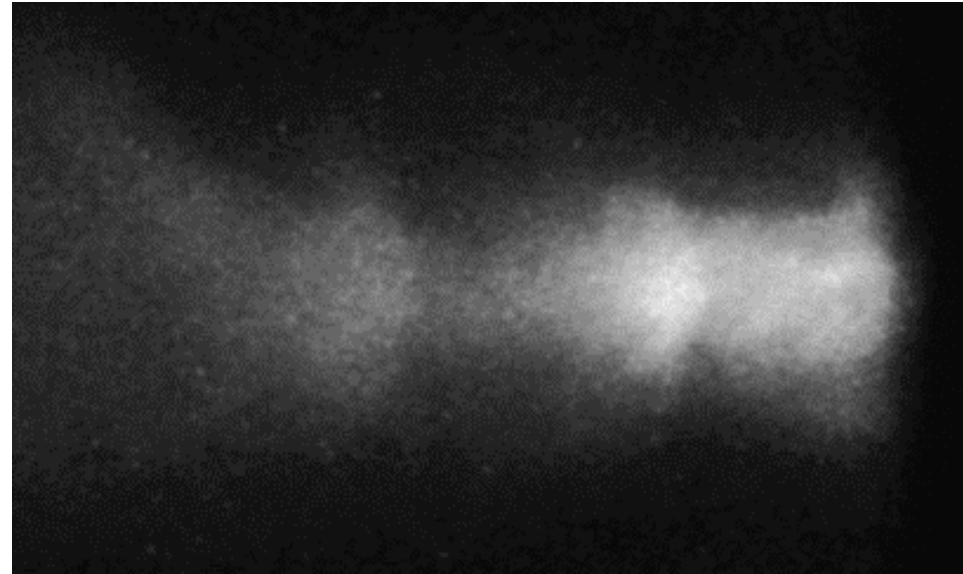
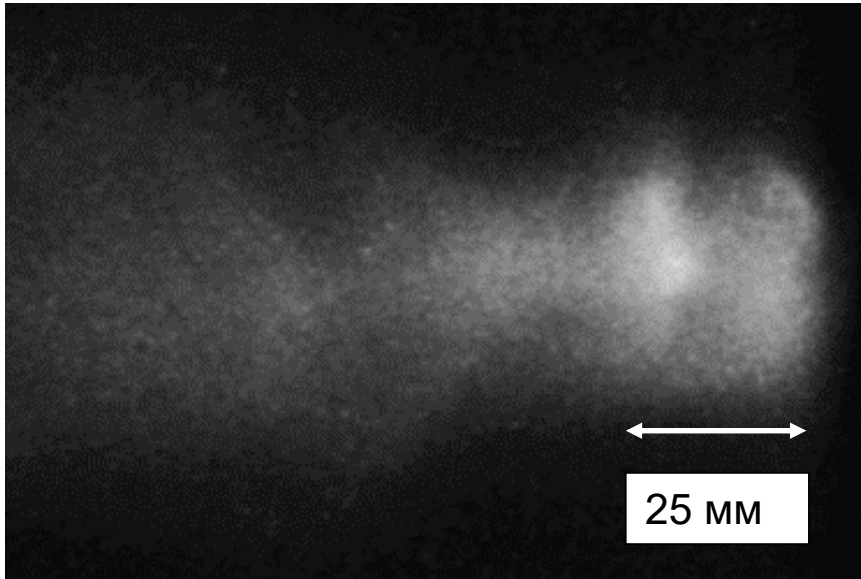
свечение области компрессии – много примесей



Контроль положения и  
равномерности разряда



Затенение области  
компрессии,  
экспозиция 1 мкс

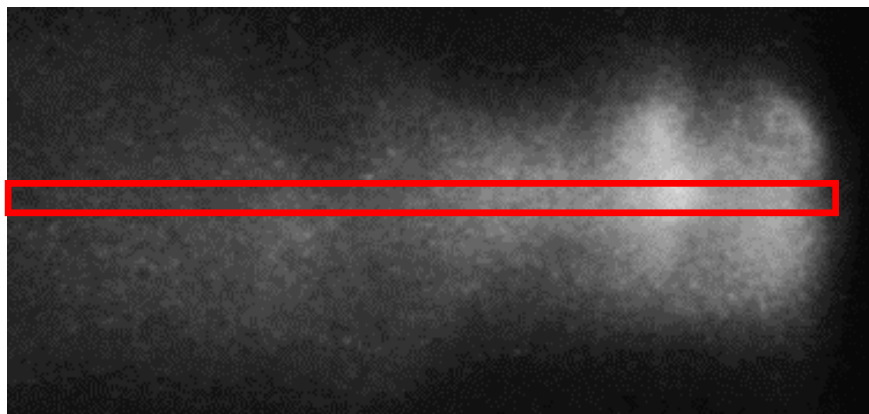


Экспозиция 60 нс

Размер неоднородности потока 8 – 12 мм

Расстояние между неоднородностями 30 – 50 мм

# Определение скорости потока, водород



Высокоскоростная регистрация с максимальной скоростью съемки и узким кадром (16 пикселей по высоте)

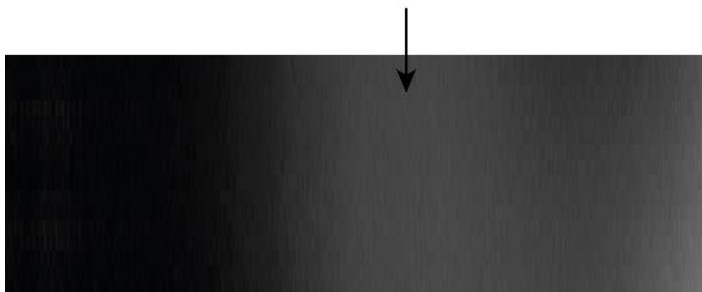
Экспозиция 1 мкс, между кадрами 1,5 мкс



Анализ последовательных кадров:

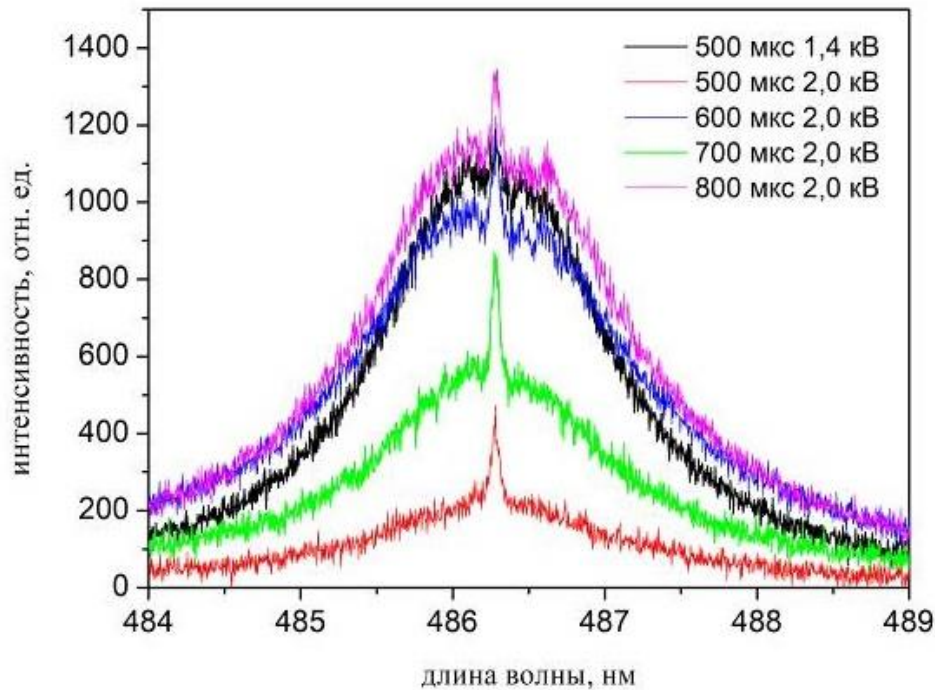
Смещение яркой области 6 см

Скорость 40 км/с

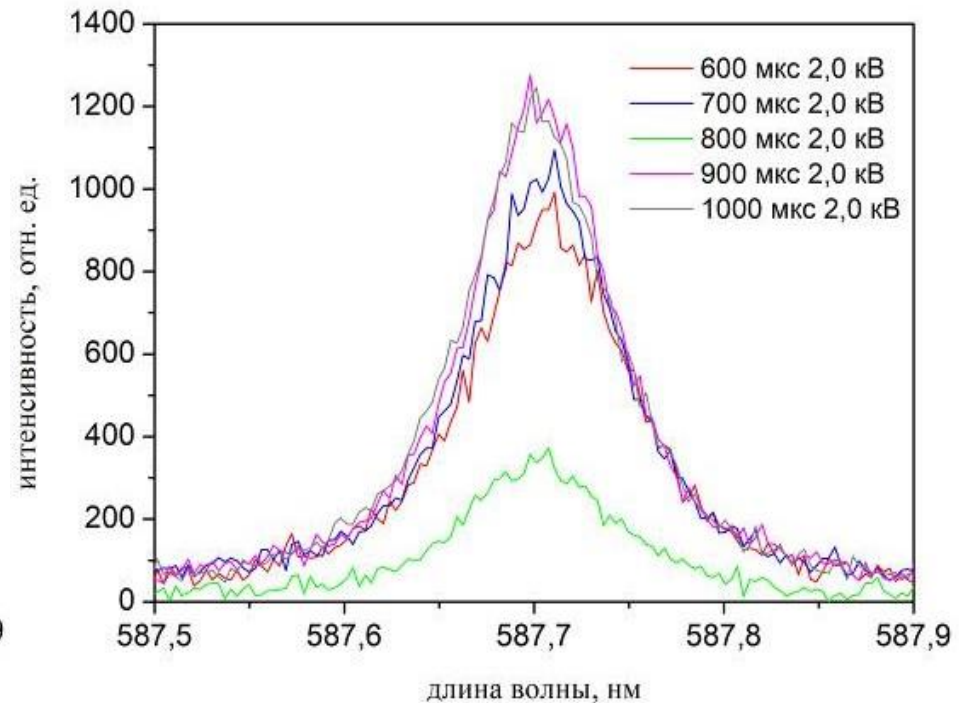


# Определение концентрации по уширению линий

## Экспозиция 700 мкс

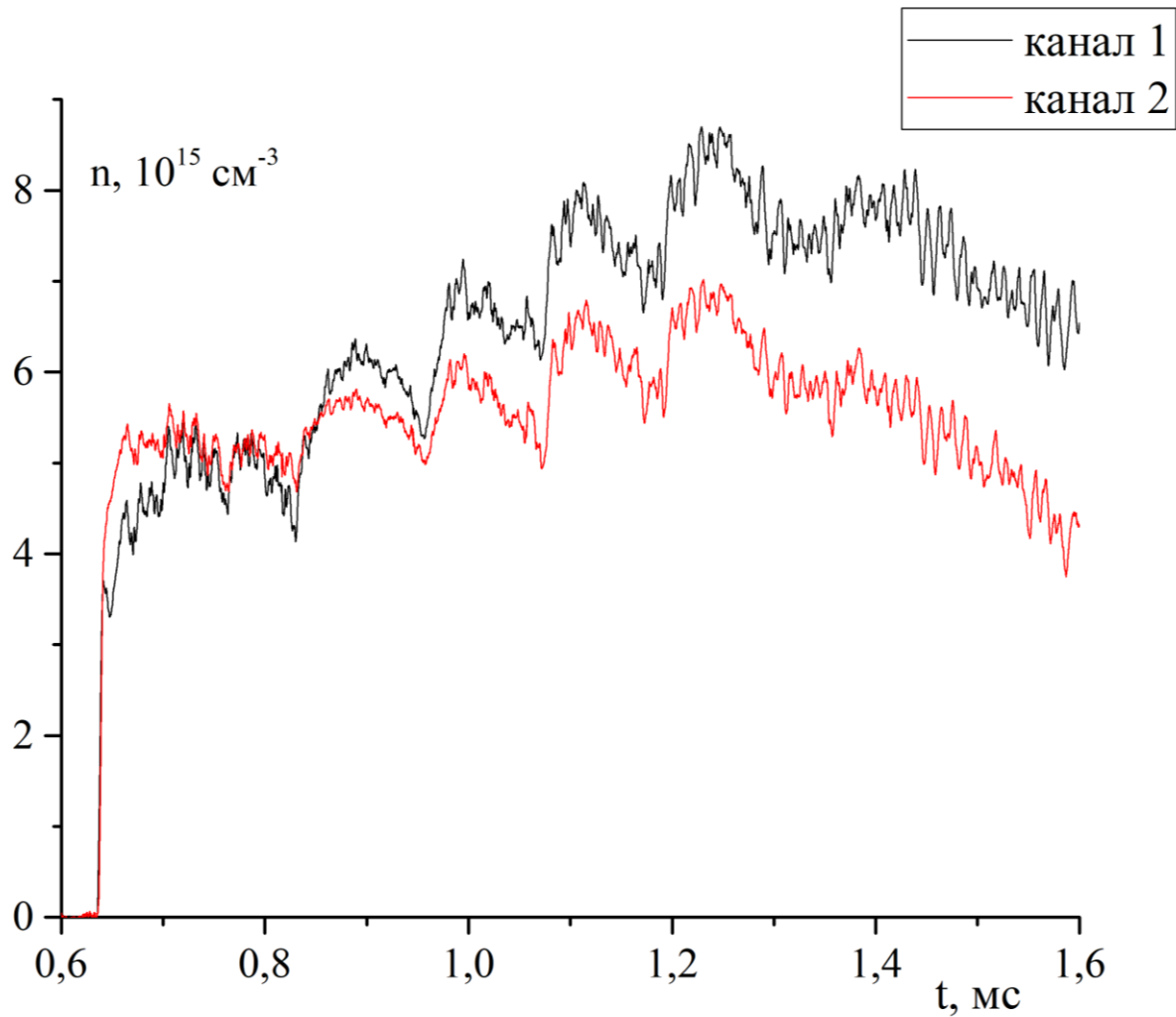


**Водород (и дейтерий)**  
Ширина линии  $2,0 \pm 0,3$  нм ( $2,1 \pm 0,5$  нм)  
Концентрация плазмы  $3 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>



**Гелий**  
Ширина линии  $0,09 \pm 0,01$  нм,  
Концентрация плазмы  $6 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>

# Гетеродинная интерферометрия - концентрация



Водород

Напряжение батареи 2 кВ

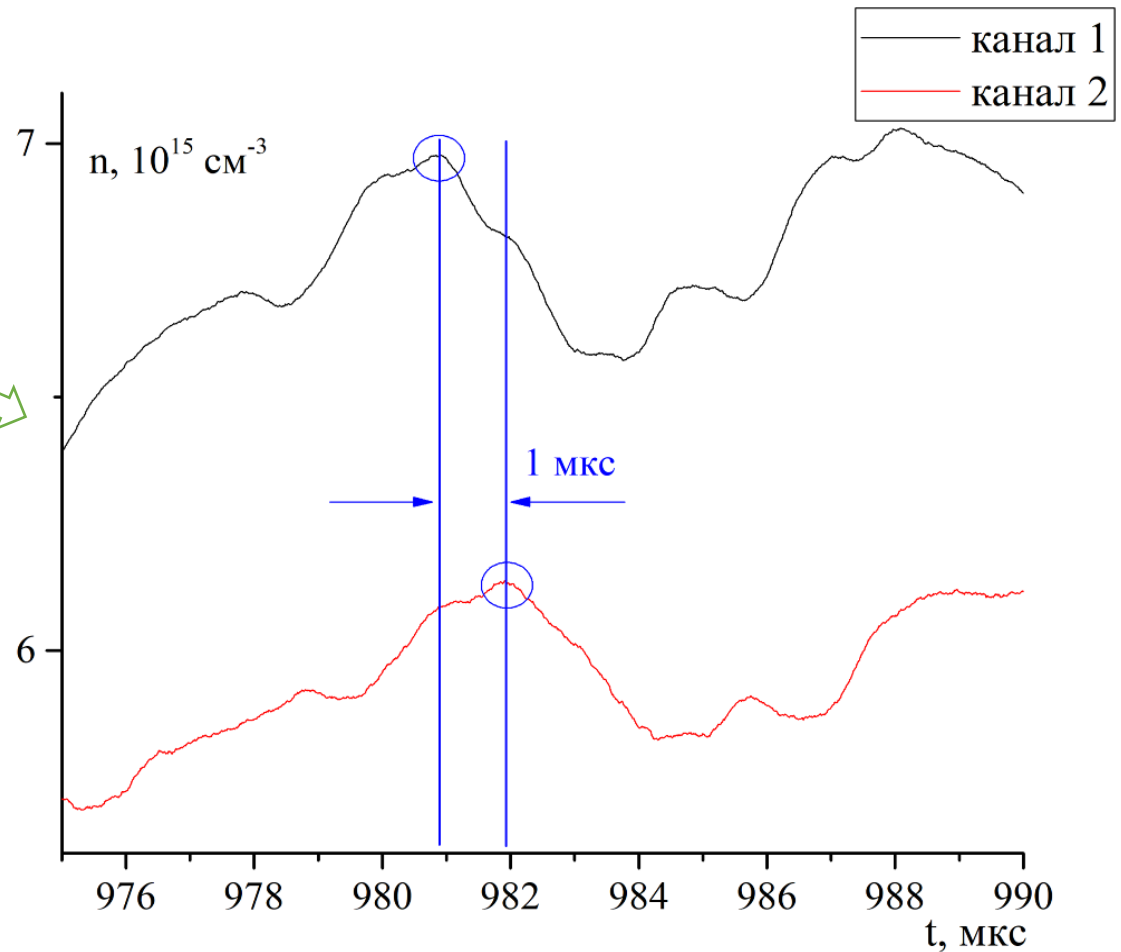
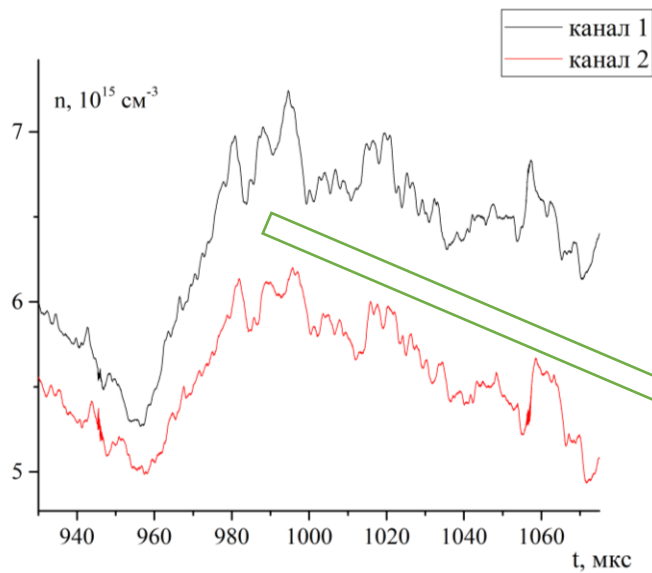
Размер области 10 см



# Гетеродинная интерферометрия – определение скорости



ТРИНИТИ  
РОСАТОМ

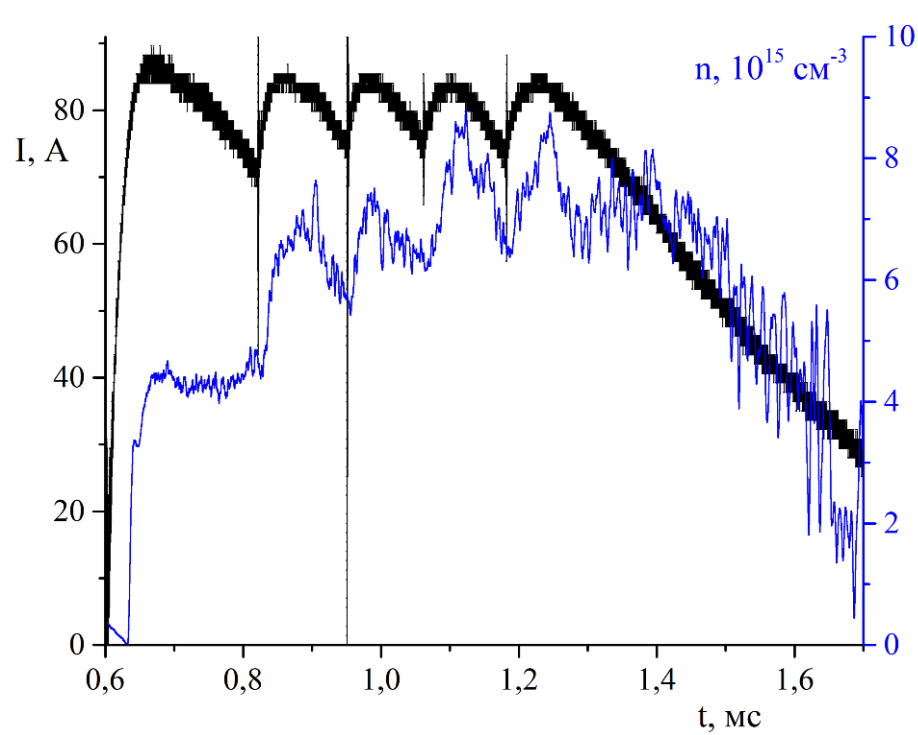


**Расстояние между каналами – 5 см**

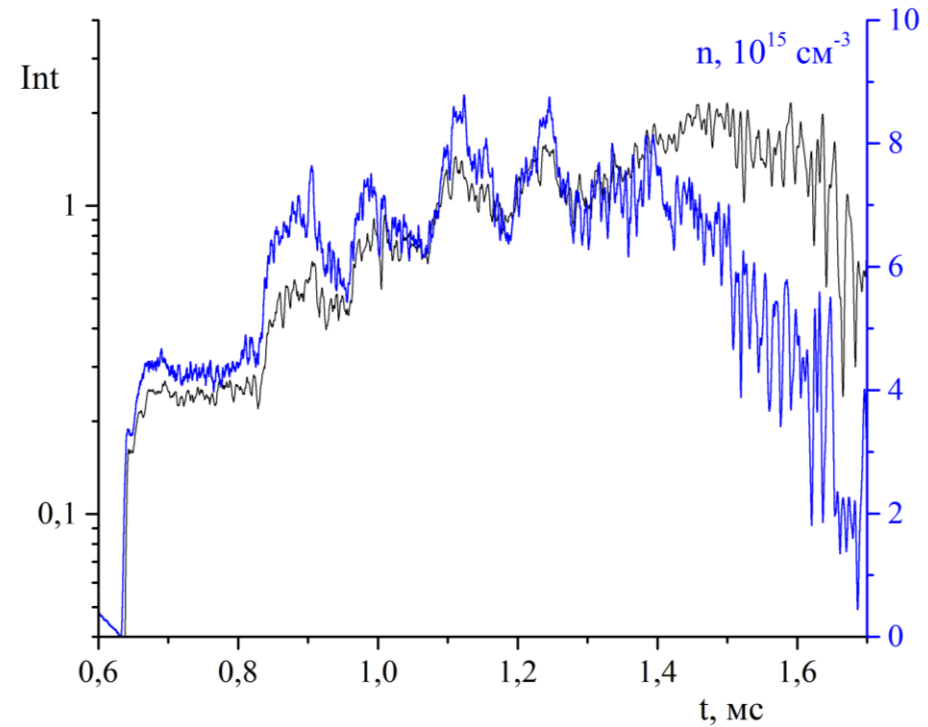
**Задержка – 1 мкс**

**Скорость – 50 км/с**

# Связь концентрации и свечения потока

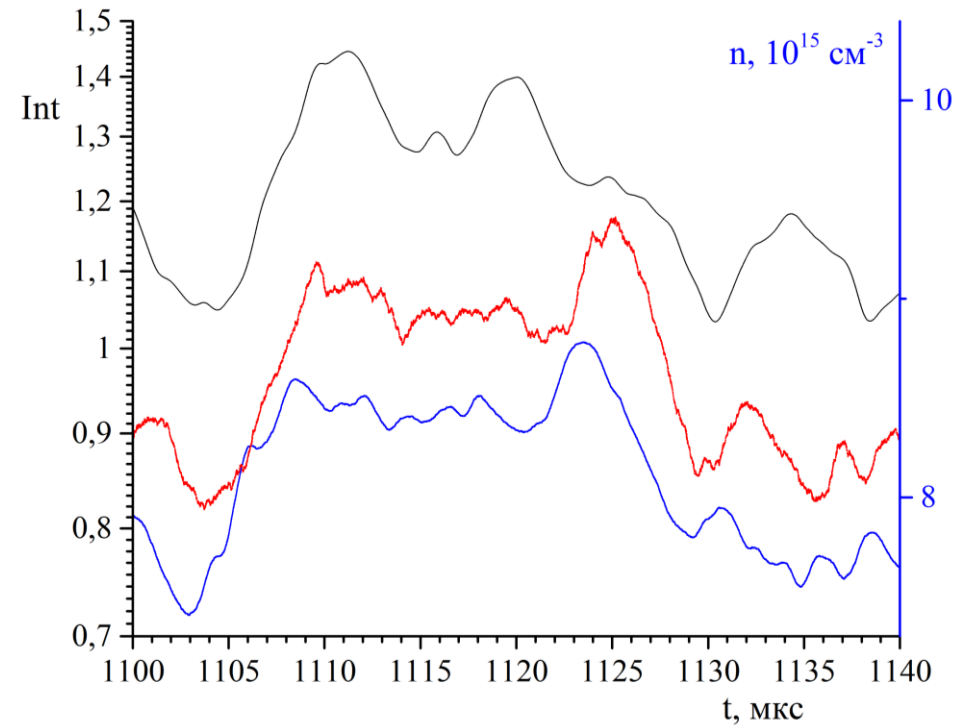
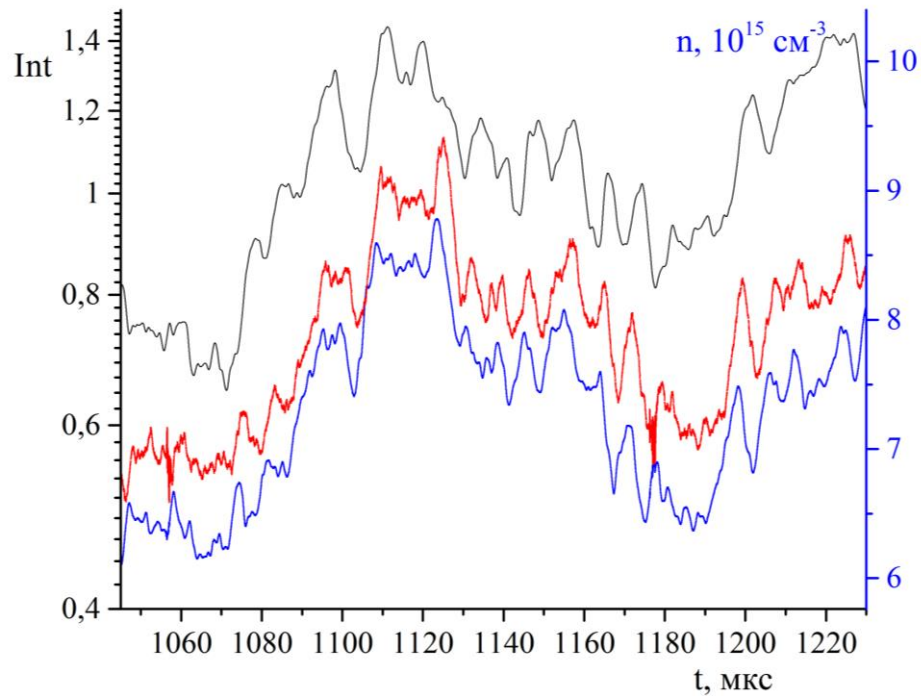


Концентрация следует за током разряда

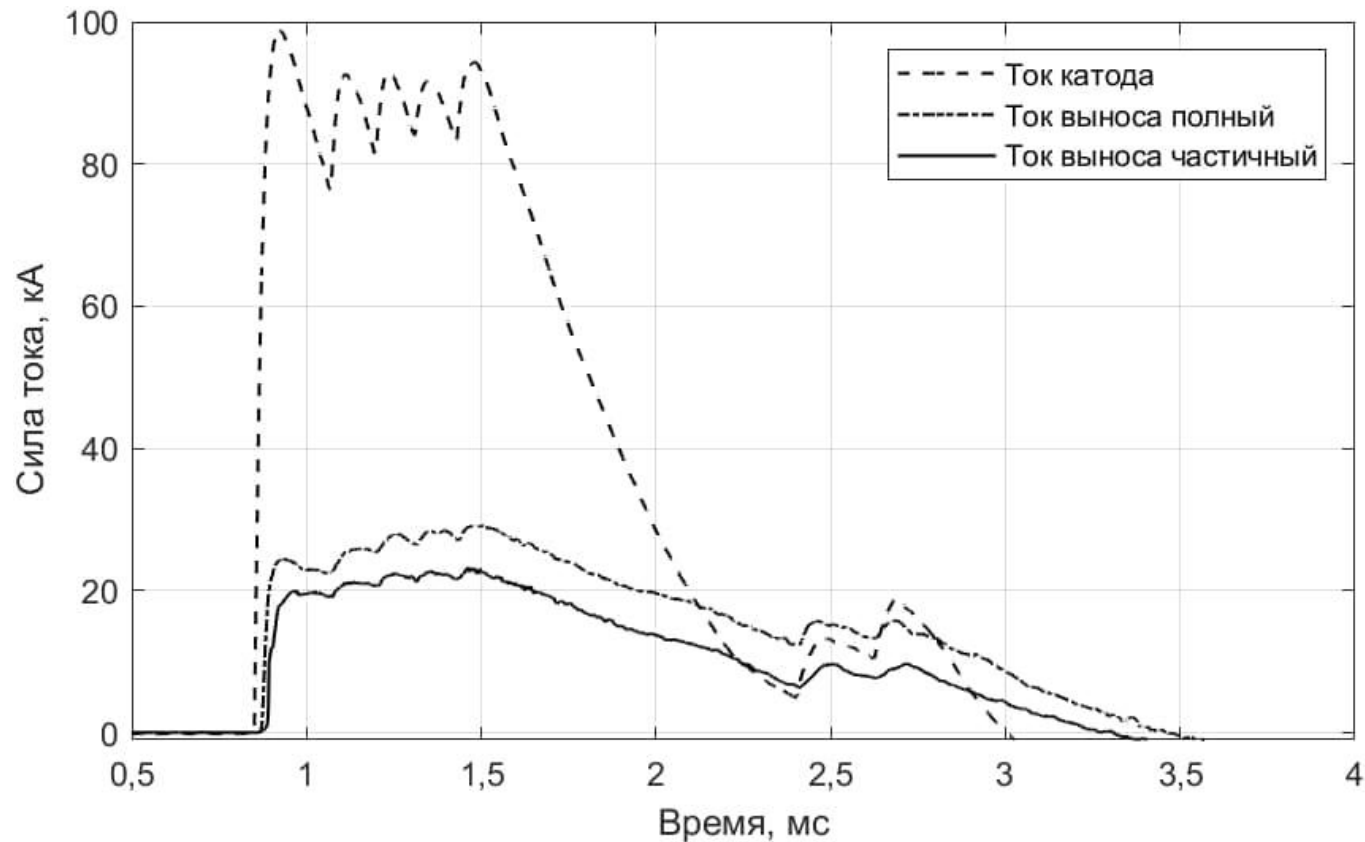


Интенсивность свечения коррелирует с концентрацией

# Связь концентрации и свечения потока

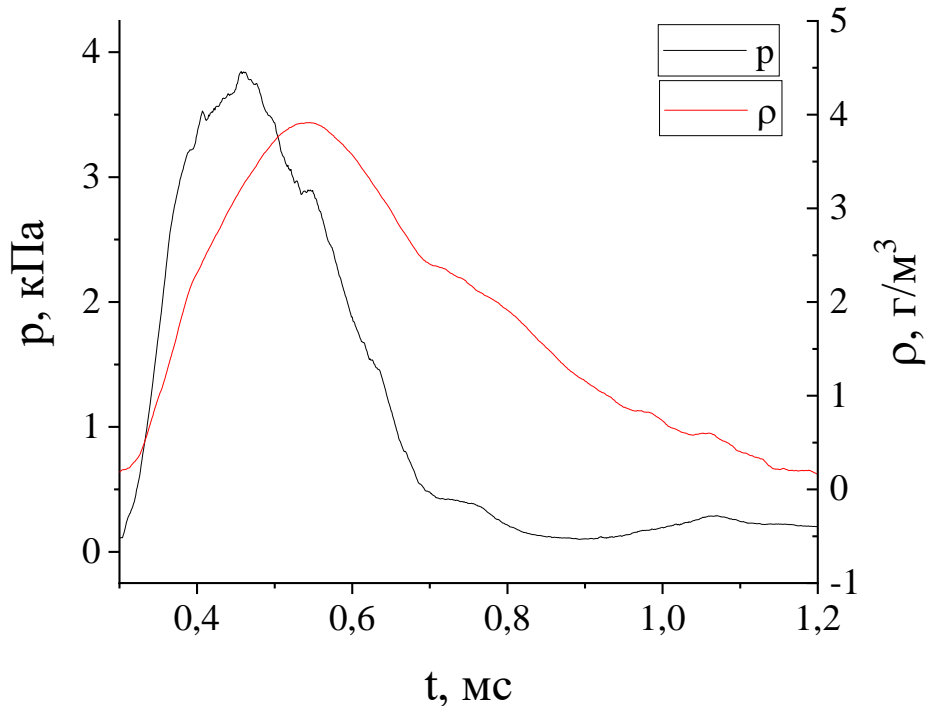


**Интенсивность свечения очень подробно повторяет сигнал концентрации в основной стадии разряда**



## Пояса Роговского:

- за пределы электродов выносятся 20 – 25 % разрядного тока
- 20% замыкаются на вакуумную камеру на расстояниях свыше 80 см



$p$  – датчик динамического давления

$\rho$  – интерферометр

- расход  $\Delta m = 1,7 \pm 0,2$  г за импульс
- длительность газового импульса 270 мкс

максимальная плотность достигается через 540 мкс после начала работы клапана

$\rho = 2,8 \pm 0,6$  г/м<sup>3</sup> на оси симметрии клапана

$\rho = 2,3 \pm 0,3$  г/м<sup>3</sup> на 2 см ниже оси клапана

$\rho = 1,9 \pm 0,4$  г/м<sup>3</sup> на 4 см ниже оси клапана

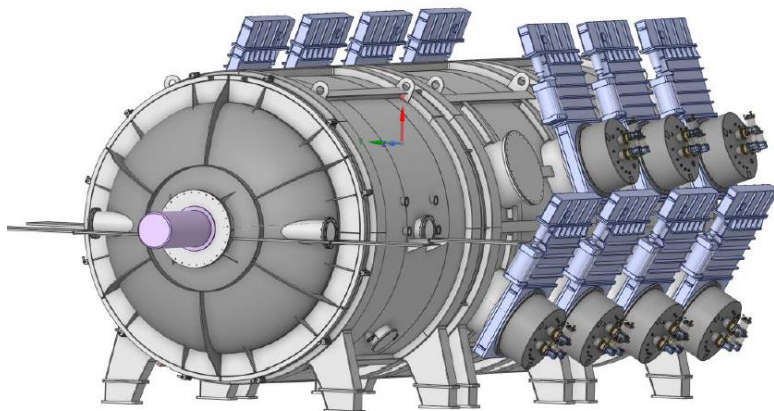
Скорость при максимальной плотности:

$v = 908 \pm 57$  м/с на оси симметрии

$v = 1083 \pm 97$  м/с на 2 см ниже оси клапана

$v = 994 \pm 83$  м/с на 4 см ниже оси клапана

# Система высокопроизводительной вакуумной откачки, ориентированная на откачку больших потоков водорода



Крионасос для откачки потока водорода  
на уровне 3100 ссст и 70 000 л/с

ТМН – 2300 л/с по водороду

Сухая форвакуумная откачка – 3200 м<sup>3</sup>/ч