

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.384.6

ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ МОНИТОР НА НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ  
КАНАЛЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА ПРОТОНОВ ЛИНЕЙНОГО  
УСКОРИТЕЛЯ ИЯИ РАН<sup>1</sup>

© 2024 г. С. А. Гаврилов<sup>a, b, \*</sup>, Ю. Ж. Калинин<sup>a</sup>, И. И. Полоник<sup>a, b</sup>,

А. И. Титов<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup> Институт ядерных исследований Российской академии наук

Россия, 117312, Москва, ~~Проспект~~<sup>Проспект</sup> 60-летия Октября, 7а

<sup>b</sup> Московский физико-технический институт

(Национальный исследовательский университет)

Россия, 141700, Долгопрудный, Московская обл., Институтский переулок, 9

\*e-mail: s.gavrilov@inr.ru

Поступила в редакцию 06.12.2023 г.

После доработки 24.04.2024 г.

Принята к публикации 25.04.2024 г.

Для проведения неразрушающих измерений профиля и положения пучка протонов в низкоэнергетическом канале транспортировки линейного ускорителя ИЯИ РАН был установлен флуоресцентный монитор на основе свечения остаточного газа в вакуумной камере канала. В данной работе представлены конструктивные особенности устройства и экспериментальные результаты измерений в сеансах работы ускорителя, а также приведены оценки чувствительности, точности и разрешения монитора, на основе которых могут быть определены допустимые режимы работы и необходимые параметры оптической системы регистрации диагностических изображений для различных сочетаний параметров пучка и вакуумной системы ускорителя. Показана принципиальная возможность реализации данного типа диагностики для подобных каналов транспортировки высокоэнергетических протонных пучков на основе системы стандартных камер машинного зрения без усилителей изображения и дополнительного напуска газа в объем канала.

---

<sup>1</sup> Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, Новосибирск.

~~Ключевые слова: неразрушающая диагностика пучка, измерение профиля пучка, монитор свечения остаточного газа, обработка изображений~~

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Базовый принцип работы флуоресцентного монитора (ФЛУМ) основан на том, что пучок вызывает свечение остаточного газа в вакуумной камере, при этом время жизни возбужденных состояний молекул и атомов остаточного газа находится в диапазоне 10–100 нс, что соответствует процессу флуоресценции. Свечение газа вызвано как первичным взаимодействием пучка с газом, так и вторичными электронами, образующимися в результате ионизации газа. Основной вклад в свечение, вызванное высокоэнергичными частицами пучка, вносят ионизация и диссоциация газа, в результате которых образуются атомы газа в возбужденном состоянии, испускающие в дальнейшем фотоны при переходе в основное состояние. Также свой вклад вносит первичное возбуждение нейтральных молекул остаточного газа, в то время как вторичные электроны вызывают свечение за счет возбуждения нейтральных молекул [1] и рекомбинации с ионами, сопровождающейся образованием нейтральных молекул в возбужденном состоянии и последующим испусканием фотонов [2]. На рис. 1 изображена базовая схема ФЛУМ.

**Рис. 1.** Схема базовой конфигурации ФЛУМ.

Часть образовавшихся фотонов, прошедшая через окно, фокусируется оптической системой на ПЗС-матрицу, формируя изображение для восстановления поперечного профиля и положения пучка. При энергиях протонов больше примерно 80 кэВ ионизационные потери снижаются, уменьшая число рождаемых фотонов. В таком случае для измерения профиля в камере локально повышается давление путем накачивания дополнительного газа либо впрыскивания газовой струи под высоким давлением, а также используются камеры с усилителями изображения на основе микроканальных пластин [3], однако стоимость и габариты общей сборки такого детектора существенно возрастают. Целью данной работы является проверка возможности использования относительно простого, экономичного и компактного устройства на основе стандартных камер машинного зрения (рис. 2) без напуска газа и усилителей изображения в типичных условиях каналов транспортировки пучков низких энергий на линейных ускорителях

(ЛУ) ионов на примере канала инъекции пучка протонов энергией 400 кэВ и импульсным током до 70 мА в ЛУ ИЯИ РАН.

**Рис. 2.** Модель ФЛУМ, установленного на канале инъекции протонов ЛУ ИЯИ РАН.

## 2. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ

Установленный ФЛУМ (рис. 3) состоит из вакуумной камеры апертурой 50 мм с двумя окнами стандарта SF35 из боросиликатного стекла. Для минимизации паразитных переотражений внутренние поверхности камеры и патрубков покрыты слоем лака на основе мелкодисперсного графита, растворенного в изопропанол: спирт испаряется после распыления и дополнительного прогрева, оставляя на поверхности тонкий матовый токопроводящий слой графита.

**Рис. 3.** Фотография ФЛУМ, установленного на канале инъекции протонов ЛУ ИЯИ РАН.

Рабочее давление в канале инъекции составляет примерно  $10^{-7}$ – $10^{-6}$  мбар, при этом остаточный газ преимущественно состоит из паров воды ( $H_2O$  составляет порядка 40%), водорода ( $H_2$  около 18%) и азота ( $N_2$  примерно 7%), а также содержит угарный газ ( $CO$  около 7%) и метан ( $CH_4$  порядка 10%) вследствие исторически сложившейся на канале предварительной откачки масляными форвакуумными насосами с последующей высоковакуумной откачкой магниторазрядными насосами.

Свечение газа регистрируется двумя типичными черно-белыми ПЗС-камерами машинного зрения, основные параметры которых приведены в табл. 1.

**Табл. 1.** Параметры ПЗС-камер и объективов

	X-камера	Y-камера
Модель	Basler acA780-75gm	LEO 1200H-30gm
Разрешение, пкс	782 × 582	1280 × 960
Размер пикселя, мкм	8.3 × 8.3	3.75 × 3.75
Экспозиция	20 мкс–5с	34 мкс–1 с
Динамический диапазон	1000	1000
Фокус объектива	Переменный	Фиксированный
Фокусное расстояние объектива, мм	25	6

Апертура объектива, мм	50	25
Расстояние до оси пучка, мм	180	120

Для подавления внешней оптической засветки ПЗС-камеры и вакуумные окна закрывались синефолью, а для радиационной защиты от паразитного гамма-фона расположенного рядом инжектора протонов использовались листы свинца.

Учитывая процентную долю каждой составляющей остаточного газа, их спектры излучения [4–7], спектральную зависимость коэффициента пропускания боросиликатного стекла и спектральную чувствительность ПЗС-камер, можно оценить спектральную эффективность регистрации. Пример такой оценки без учета неизвестного коэффициента пропускания линз в объективе, приведен на рис. 4.

**Рис. 4.** Расчетная спектральная эффективность регистрации излучения X-камерой ФЛУМ.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

#### 3.1. Программа сбора и обработки данных

Для регистрации и обработки изображений в режиме реального времени было написано программное обеспечение в среде LabVIEW. Базовая версия программы позволяет применять к изображению процедуру выделения интересующей области и сопоставлять положения точек на изображении с их реальными координатами для калибровки, а также удаленно управлять усилением и экспозицией камеры, суммировать несколько сделанных камерой кадров и вычитать фоновый кадр. Для измерения профиля в программе строятся проекции распределения интенсивности, вычисляется положение центра тяжести и среднеквадратичный размер пучка.

На рис. 5а показано окно программы сбора и обработки данных с типичным результатом измерений при следующих параметрах: энергия пучка 400 кэВ, импульсный ток 52 мА, длительность импульса на полувысоте 300 нс, частота следования импульсов 50 Гц, экспозиция камеры 5 с, суммирование 3 кадров.

**Рис. 5. а** – Окно программы сбора и обработки данных ФЛУМ с типичным результатом измерений; **б** – примеры изображений с различными параметрами ранговой фильтрации суммы нефильТРованных кадров.

В процессе тестирования ФЛУМ к базовой версии программы были добавлены возможности усреднения фонового кадра по заданному количеству накопленных кадров и применения произвольной ранговой фильтрации как к каждому отдельному кадру до суммирования, так и к их сумме (рис. 5б).

Оттенки синего цвета на обрабатываемом изображении связаны с визуальными настройками контрастности отображения на мониторе оператора и не характеризуют реальный регистрируемый спектр.

### 3.2. Разрешение и точность измерений

Разрешение можно определить как минимальное расстояние между бесконечно тонкими пучками, при котором их изображения попадают в разные пиксели матрицы, что, например, соответствует примерно 90 мкм для используемой X-камеры. Таким образом, основными ограничениями разрешения ФЛУМ являются конечный размер пикселя и глубина резкости изображаемого пространства (ГРИП). В случае, если пучки сдвигаются относительно фокальной плоскости, их изображения размываются, и разрешение можно оценить как  $R = \sqrt{\delta_{\text{пк}}^2 + \delta_{\text{ГРИП}}^2}$ , где  $\delta_{\text{пк}}$  – расстояние в фокальной плоскости, приходящееся на 1 пиксель матрицы (определяется расстоянием до пучка, параметрами объектива и ПЗС-матрицы),  $\delta_{\text{ГРИП}}$  – размытие изображения, вызванное смещением пучка.

Расчетная величина разрешения приведена на рис. 6. Ограничивая допустимый размер размытия изображения одним пикселем, получаем разрешение  $R = \sqrt{2} \delta_{\text{пк}} = 127$  мкм.

**Рис. 6.** Расчетное разрешение ФЛУМ.

Точность ФЛУМ ограничивается ошибками постобработки, смещением пучка от фокальной плоскости, тепловым движением атомов и молекул газа, размытием изображения пучка за счет недостаточной глубины резкости. Для используемой конфигурации ФЛУМ она составляет 10–15% во всей рабочей апертуре.

Пороговая чувствительность ФЛУМ ограничивается шумами ПЗС-матрицы, в частности вызванными ее неравномерным прогревом, фоновой засветкой, горячими пикселями и паразитными переотражениями внутри вакуумной камеры.

При смещении пучка относительно фокальной плоскости меняется масштаб наблюдаемого изображения, что приводит к ошибке измерения размера пучка. Зависимость масштаба  $\mu$  от смещения сетки относительно фокальной плоскости приведена на рис. 7. При смещении оси пучка на 10 мм от фокальной плоскости относительное изменение масштаба составляет примерно 4%.

**Рис. 7.** Масштаб изображения в зависимости от смещения относительно фокальной плоскости.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Флуоресцентный монитор для неразрушающей диагностики поперечного профиля и положения пучка по свечению остаточного газа был установлен и протестирован на низкоэнергетическом канале транспортировки пучка протонов ЛУ ИЯИ РАН с пучками энергией 400 КэВ, током 50–70 мА, частотой следования импульсов 50 Гц и длительностью импульсов тока 0.25–170 мкс. В ходе тестирования были установлены оптимальные настройки ПЗС-камер и параметры постобработки получаемых изображений пучка. Также были отмечены основные эффекты, ограничивающие точность и разрешение датчика, и сделаны численные оценки для используемой конфигурации ФЛУМ. Полученные результаты подтверждают возможность использования ФЛУМ, работающего на основе стандартных ПЗС-камер машинного зрения без напуска газа и усилителей изображения, для подобных низкоэнергетических каналов инъекции сильноточных протонных пучков.

Постобработка с применением суммирования кадров и ранговой фильтрации изображений позволила уменьшить шумовую компоненту. Сравнение полученных результатов показывает, что при использовании низких рангов измеренный профиль соответствует только ядру пучка, а при использовании высоких рангов профиль уширяется и искажается горячими пикселями. Фильтры с маленьким размером окна фильтрации плохо справляются с очисткой изображения от шумовой компоненты, а при

использовании фильтров с большим размером окна фильтрации ухудшается эффективное разрешение изображения. В качестве оптимума был выбран медианный фильтр, применяемый как к каждому отдельному кадру, так и к их итоговой сумме.

Для уменьшения тепловых шумов ПЗС-матрицы можно рекомендовать использование камер с внешней синхронизацией, у которых частота срабатывания затвора может быть равна или кратна частоте следования сгустков пучка. В таком случае экспозиция камеры, если позволяют ее технические характеристики, может быть установлена равной длительности импульса тока пучка, что существенно ограничит время нагрева матрицы по сравнению с вынужденными длинными экспозициями, которые необходимы для захвата несколько сотен импульсов при использовании несинхронизованных с пучком камер. Кроме того, возможно использование относительно простого внешнего охлаждения корпуса камеры на основе элементов Пельтье.

Существенный вклад в погрешность измерений размера пучка вносит смещение оси пучка от фокальной плоскости объектива, однако измерение положения центра тяжести пучка по одной оси определяет смещение пучка относительно фокальной плоскости по второй оси и может быть использовано для оценки погрешности размера пучка по этой оси.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 6 “Ядерная и радиационная физика” (НЦФМ-6-2325-113).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Becker F., Andre C., Dorn C., Forck P., Haseitl R., Walasek-Hoehne B., Dandl T., Heindl T., Ulrich A.* Beam Induced Fluorescence Monitors for FAIR // Proc. of IPAC12. New Orleans: IEEE. 2013. P.798.
2. *Hampf R., Wieser J., Ulrich A.* // Eur. Phys. J. D. 2023. V. 77. № 51.  
<https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-023-00624-6>

3. *Forck P.* Lecture notes on beam instrumentation and diagnostics // Proc. of Joint Universities Accelerator School (JUAS 2023). Darmstadt. 2023.
4. *Monce M.N., Pan S., Radeva N.L., Pepper J.L.* // Phys. Rev. A. 2009. V. 79. Iss. 1. P. 012704.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.79.012704>
5. *Edwards J.L., Thomas E.W.* // Phys. Rev. 1968. V. 165. Iss. 1. P. 16.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.165.16>
6. *Dotchin L.V., Chupp E.L., Pegg D.J.* // J. Chem. Phys. 1973. V. 59. P. 3960.  
<https://doi.org/10.1063/1.1680585>
7. *Hughes R., Philpot J.L., Fan C.Y.* // Phys. Rev. 1961. V. 123. Iss. 6. P. 2084.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.123.2084>

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

**Рис. 1.** Схема базовой конфигурации ФЛУМ.

**Рис. 2.** Модель ФЛУМ, установленного на канале инъекции протонов ЛУ ИЯИ РАН.

**Рис. 3.** Фотография ФЛУМ, установленного на канале инъекции протонов ЛУ ИЯИ РАН.

**Рис. 4.** Расчетная спектральная эффективность регистрации излучения X-камерой ФЛУМ.

**Рис. 5. а** – Окно программы сбора и обработки данных ФЛУМ с типичным результатом измерений; **б** – примеры изображений с различными параметрами ранговой фильтрации суммы нефильТРованных кадров.

**Рис. 6.** Расчетное разрешение ФЛУМ.

**Рис. 7.** Масштаб изображения в зависимости от смещения относительно фокальной плоскости.

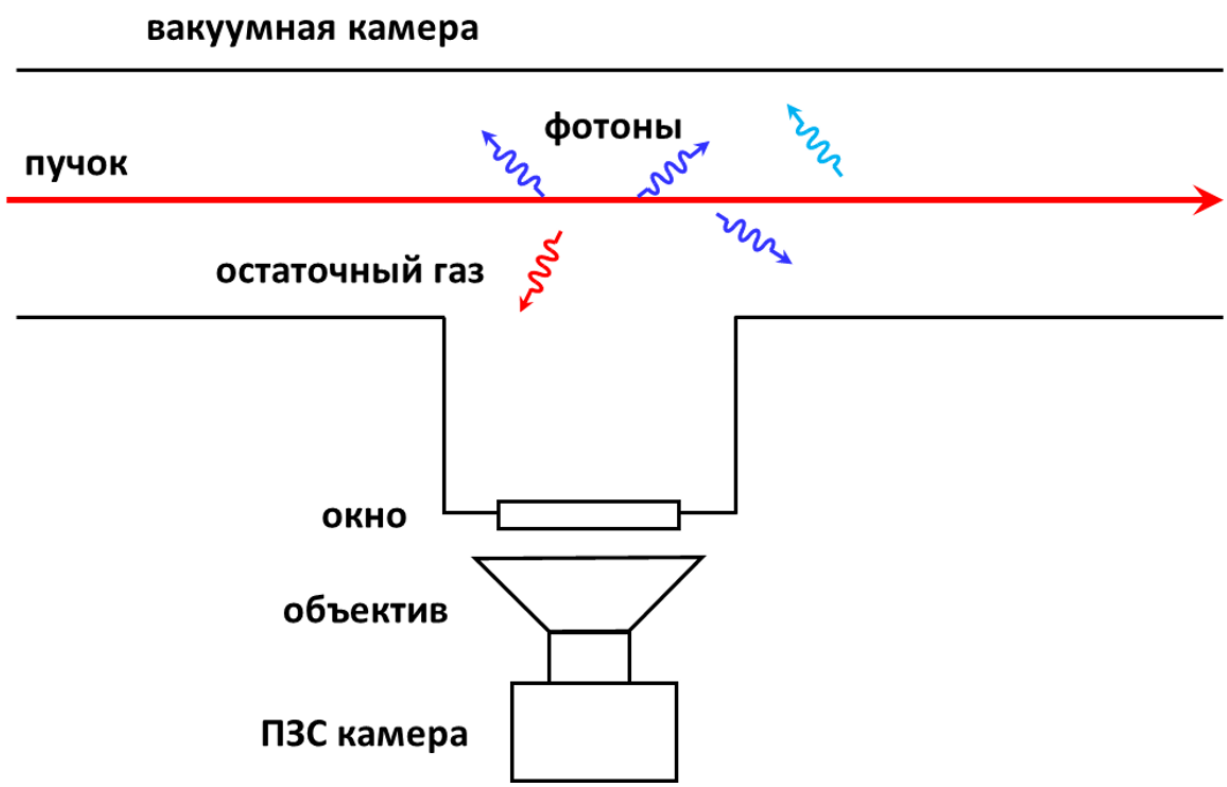


Рис. 1

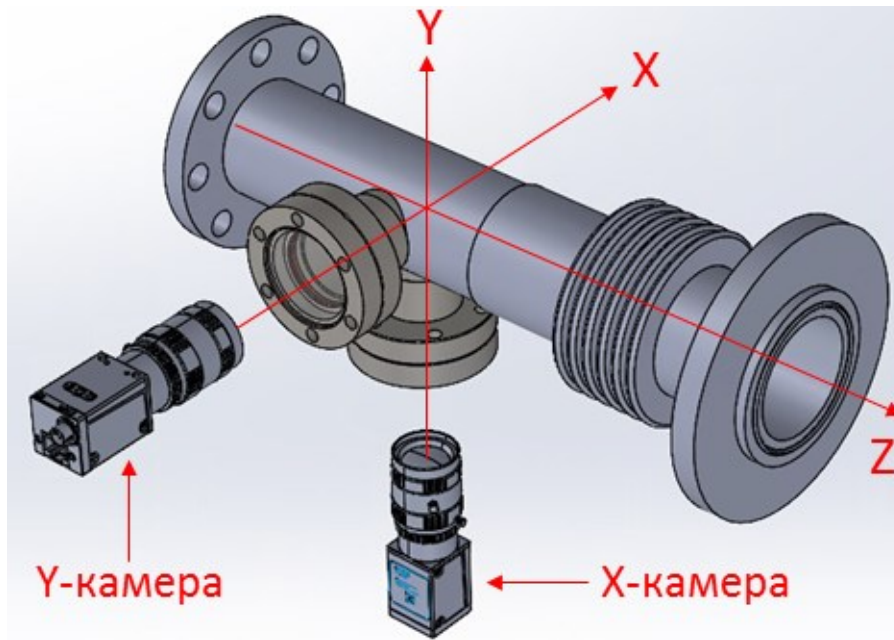


Рис. 2



Рис. 3

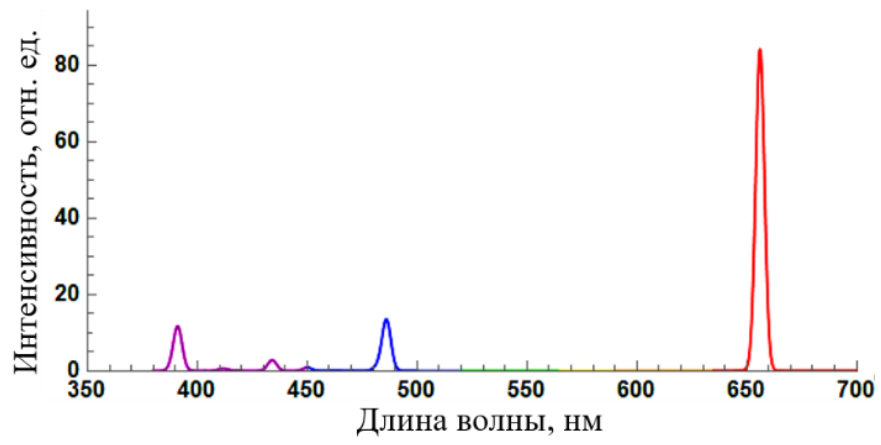


Рис. 4

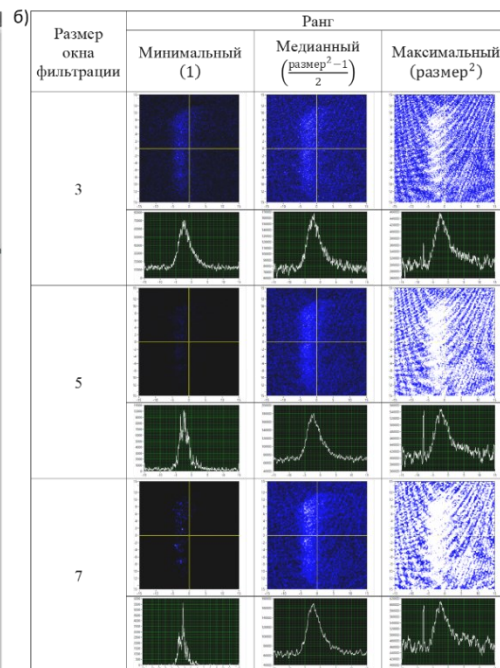
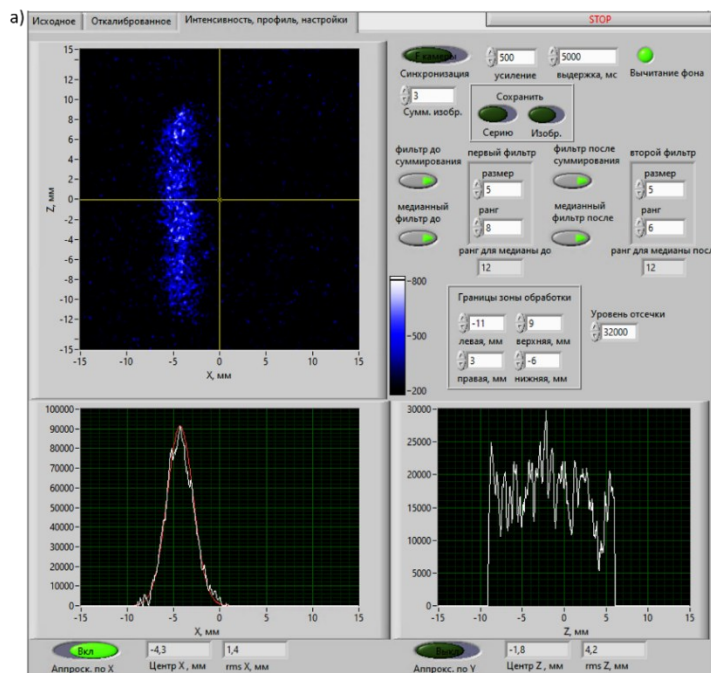


Рис. 5

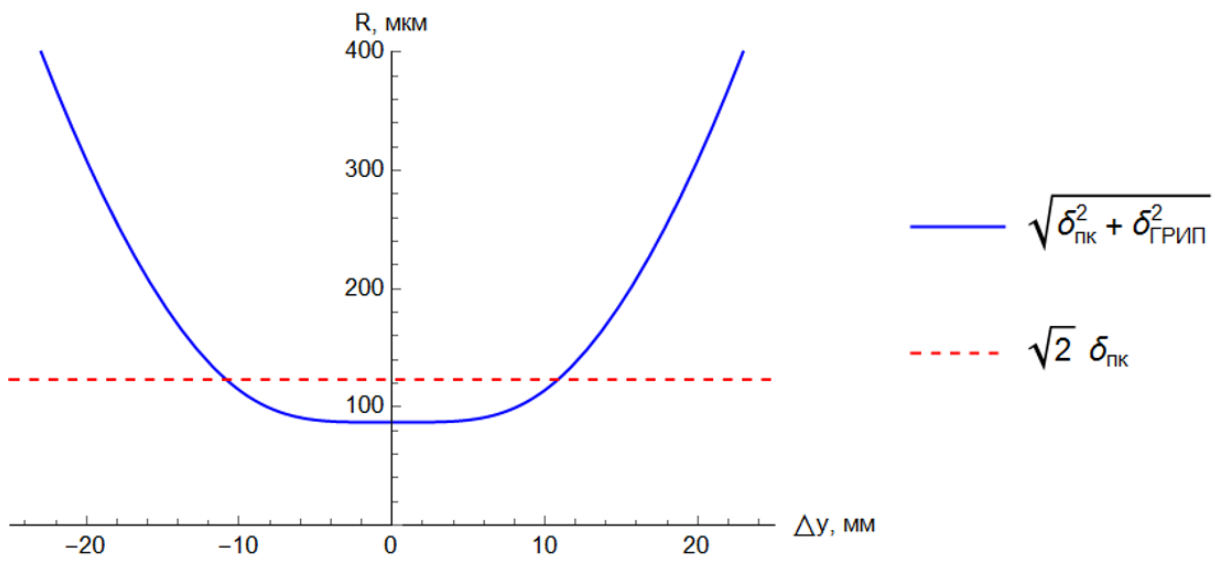


Рис. 6

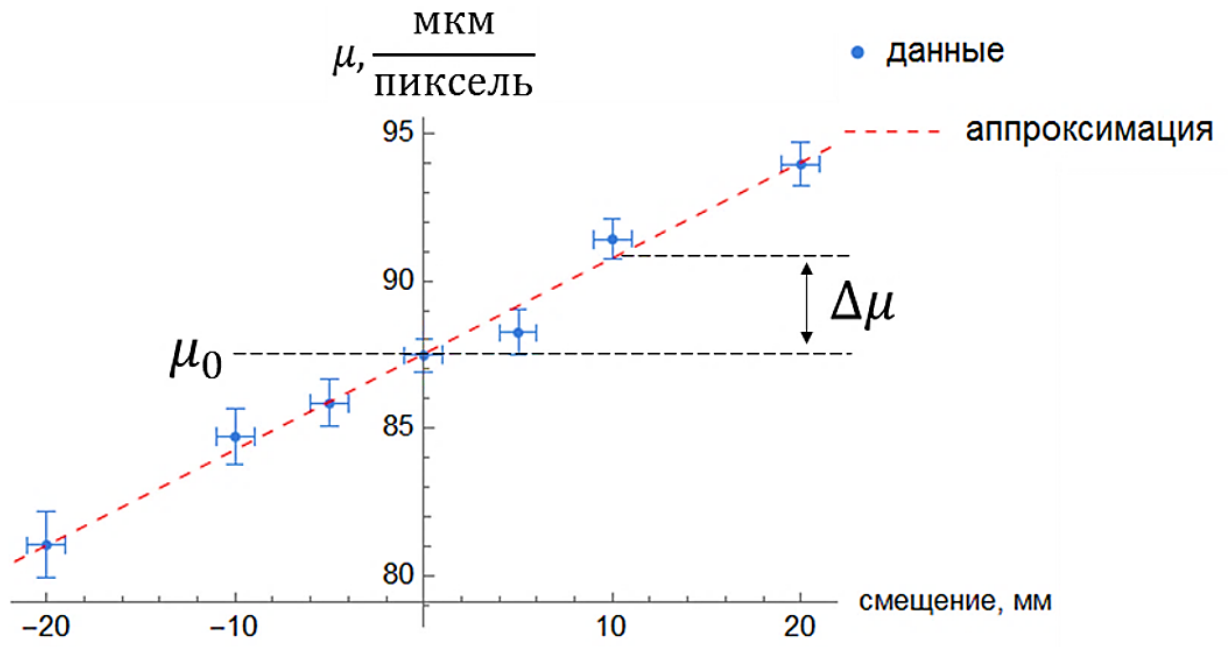


Рис. 7

**Для связи с авторами:**

Гаврилов Сергей Александрович

E-mail: s.gavrilov@inr.ru

Тел.: 8-919-770-81-53 (моб.)

Калинин Юрий Жоржевич

E-mail: kalinin@inr.ru

Полоник Иван Игоревич

E-mail: polonik.ii@phystech.edu

Титов Александр Иванович

E-mail: alexander.i.titov@yandex.ru

**Для переводчика:**

**BEAM INDUCED FLUORESCENCE MONITOR AT THE LEPT OF INR RAS  
PROTON LINAC**

**S. A. Gavrilov, Yu. G. Kalinin, I. I. Polonik, A. I. Titov**

Beam induced fluorescence monitor based on a fluorescence of a residual gas in a vacuum chamber of the accelerator was installed at the low-energy beam transport channel of INR RAS linear accelerator for non-destructive measurements of the proton beam profile and position. This paper presents design features of the device and experimental results of measurements during accelerator runs, and also provides estimates of the sensitivity, accuracy and resolution of the monitor, on the basis of which acceptable operation modes and the necessary parameters of the optical system for diagnostic images registration for various combinations of beam parameters and accelerator vacuum system parameters can be determined. The principal possibility of implementing this type of diagnostics for such channels for transporting high-current proton beams based on a system of standard machine vision cameras without image intensifiers and additional gas injection into the channel volume is shown.

**Keywords:** non-destructive beam diagnostics, beam profile measurements, beam induced fluorescence monitor, image processing

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Becker F., Andre C., Dorn C., Forck P., Haseitl R., Walasek-Hoehne B., Dandl T., Heindl T., Ulrich A. Beam Induced Fluorescence Monitors for FAIR // Proc. of IPAC12. New Orleans: IEEE. 2013. P.798.
2. Hampf R., Wieser J., Ulrich A. // Eur. Phys. J. D. 2023. V. 77. № 51.  
<https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-023-00624-6>
3. Forck P. Lecture notes on beam instrumentation and diagnostics // Proc. of Joint Universities Accelerator School (JUAS 2023). Darmstadt. 2023.
4. Monce M.N., Pan S., Radeva N.L., Pepper J.L. // Phys. Rev. A. 2009. V. 79. Iss. 1. P. 012704.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.79.012704>

5. Edwards J.L., Thomas E.W. // Phys. Rev. 1968. V. 165. Iss. 1. P. 16.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.165.16>
6. Dotchin L.V., Chupp E.L., Pegg D.J. // J. Chem. Phys. 1973. V. 59. P. 3960.  
<https://doi.org/10.1063/1.1680585>
7. Hughes R., Philpot J.L., Fan C.Y. // Phys. Rev. 1961. V. 123. Iss. 6. P. 2084.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.123.2084>