

ISSN 1561-2430 (Print)  
 ISSN 2524-2415 (Online)  
 УДК 539.12  
<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2020-56-4-449-458>

Поступила в редакцию 20.10.2020  
 Received 20.10.2020

Д. С. Василевская<sup>1</sup>, Д. Н. Григорьев<sup>2,3,4</sup>, И. Г. Дудко<sup>1</sup>, В. Л. Иванов<sup>2,3</sup>, В. Ф. Казанин<sup>2,3</sup>,  
 А. Н. Козырев<sup>2,3</sup>, А. А. Рубан<sup>2,3</sup>, А. Е. Рыжененков<sup>2,3</sup>, С. С. Толмачев<sup>2</sup>, Г. В. Федотович<sup>2,3</sup>,  
 Д. Н. Шемякин<sup>2,3</sup>, Д. В. Шёлковий<sup>1</sup>, Л. Б. Эпштейн<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук,  
 Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>4</sup>Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

### ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ С ДЕТЕКТОРОМ КМД-3 НА ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ ВЭПП-2000

**Аннотация.** Измерено сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  в области энергий от 750 до 800 МэВ в с.ц.м. на статистике, набранной детектором КМД-3 на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 в 2013 г. (интеграл светимости  $7,8 \text{ пб}^{-1}$ ). Отработана процедура выделения событий сигнала, вычисления борновского сечения и определения параметров  $\omega$ -мезона. Получены предварительные значения параметров  $\omega$ -мезона:  $m_\omega = 782,70 \pm 0,02 \pm 0,11 \text{ МэВ}$ ,  $\Gamma_\omega = 8,74 \pm 0,05 \pm 0,22 \text{ МэВ}$ ,  $\sigma_0(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0) = 1545 \pm 4 \pm 39 \text{ нб}$ . Приведено сравнение полученных результатов с предыдущими экспериментами, которые демонстрируют хорошее согласие.

**Ключевые слова:** физика элементарных частиц, процесс  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ , борновское сечение, детектор КМД-3, параметры  $\omega$ -мезона

**Для цитирования.** Изучение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  с детектором КМД-3 на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 / Д. С. Василевская [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2020. – Т. 56, № 4. – С. 449–458. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2020-56-4-449-458>

Darya S. Vasileuskaya<sup>1</sup>, Dmitry N. Grigoriev<sup>2,3,4</sup>, Igor G. Dudko<sup>1</sup>, Vyacheslav L. Ivanov<sup>2,3</sup>,  
 Vasily F. Kazanin<sup>2,3</sup>, Aleksey N. Kozyrev<sup>2,3</sup>, Aleksandr A. Ruban<sup>2,3</sup>, Artem E. Ryzhenenkov<sup>2,3</sup>, Sergey S. Tolmachev<sup>2</sup>,  
 Gennady V. Fedotovitch<sup>2,3</sup>, Dmitry N. Shemyakin<sup>2,3</sup>, Dzmistry V. Shoukavy<sup>1</sup>, Leonid B. Epshteyn<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

<sup>4</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

### STUDY OF THE PROCESS $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ WITH THE CMD-3 DETECTOR AT THE ELECTRON-POSITRON COLLIDER VEPP-2000

**Abstract.** The cross section of the process  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  was measured with the CMD-3 detector at the electron-positron collider VEPP-2000 in the energy region from 750 MeV to 800 MeV in c.m.s. This measurement was based on the data collected in 2013 and related to an integrated luminosity of about  $7.8 \text{ pb}^{-1}$ . The procedure for obtaining the Born cross section and determining the parameters of the  $\omega$ -meson was worked out. The preliminary  $\omega$ -meson parameters  $m_\omega = 782.70 \pm 0.02 \pm 0.11 \text{ MeV}$ ,  $\Gamma_\omega = 8.74 \pm 0.05 \pm 0.22 \text{ MeV}$ ,  $\sigma_0(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0) = 1545 \pm 4 \pm 39 \text{ nb}$  were obtained. The results were compared with previous data and proven to demonstrate a good agreement with them.

**Keywords:** elementary particle physics, process  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ , Born cross section, CMD-3 detector,  $\omega$ -meson parameters

**For citation.** Vasileuskaya D. S., Grigoriev D. N., Dudko I. G., Ivanov V. L., Kazanin V. F., Kozyrev A. N., Ruban A. A., Ryzhenenkov A. E., Tolmachev S. S., Fedotovitch G. V., Shemyakin D. N., Shoukavy Dz. V., Epshteyn L. B. Study of the process  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  with the CMD-3 detector at the electron-positron collider VEPP-2000. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 449–458 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2020-56-4-449-458>

**Введение.** Прецизионные данные по адронным сечениям используются во многих приложениях, в частности, для оценки адронного вклада в аномальный магнитный момент мюона (АММ),  $a_\mu = (g - 2)\mu / 2$ , который вычисляется в рамках Стандартной модели (СМ). Область энергий коллайдера ВЭПП-2000 обеспечивает основной вклад (92 %) в  $a_\mu^{\text{had}}$  и определяет точ-

ность вычисления этой величины [1]. Несмотря на успехи Стандартной модели в мире ведутся эксперименты поиска физических явлений, выходящих за ее рамки. Одним из таких экспериментов является измерение аномального магнитного момента мюона. На сегодняшний день наблюдается отличие в более чем трех стандартных отклонения между предсказанием СМ и наиболее точным результатом измерения в эксперименте Muon g-2 E821 в Брукхэвенской национальной лаборатории (США) [2]. В новом эксперименте E989, проводимом в Национальной ускорительной лаборатории (FNAL, США)<sup>1</sup> аномальный магнитный момент мюона будет измерен с точностью 0,14 ppm, что примерно в четыре раза лучше в сравнении с предыдущим экспериментом [2]. В другом эксперименте на ускорительном комплексе J-PARC (Япония) [3] планируется использовать охлажденный пучок мюонов, который позволит отказаться от электростатической фокусировки и проводить измерения при значительно меньшем импульсе мюонов, что даст возможность в итоге избежать целого комплекса многих систематических погрешностей и достичь точности 0,1 ppm.

Таким образом, благодаря разным методам измерения аномального магнитного момента мюона систематические ошибки в этих двух экспериментах будут практически независимы. В настоящее время в Институт ядерной физики СО РАН ведутся эксперименты с Криогенным магнитным детектором (КМД-3) на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 [4]. Основная физическая программа экспериментов – прецизионное измерение эксклюзивных адронных сечений, изучение динамики рождения многоадронных состояний и физики адронных взаимодействий в секторе легких кварков.

Одним из многих, но важных процессов является процесс  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  в области энергий  $\omega$ -мезона от 750 до 800 МэВ в с.с.м. В настоящий момент одна из основных ошибок при вычислении адронного вклада в  $a_\mu^{\text{had}}$  связана с расхождением результатов измерений данного сечения детекторами СНД [5] и КМД-2 [6]. Это различие приводит к неточности вычисления АММ мюона порядка 0,1 ppm, что сравнимо с предполагаемой точностью измерений вышеназванных экспериментов<sup>2</sup> [3].

В настоящей работе приводятся предварительные результаты анализа с использованием интегральной светимости порядка  $7,8 \text{ пб}^{-1}$ , набранной в сезоне 2013 г. Анализ набранной статистики проводился в 11 точках по энергии, точность измерения которых в среднем составляла порядка 100 кэВ с использованием методики резонансной деполяризации [7]. Точность измерения интегральной светимости составила 1,5–2,5 % и измерялась с использованием процесса Баба рассеяния на большие углы и процесса двухквантовой аннигиляции. Регистрация этих процессов использует совершенно разные подсистемы детектора, что в свою очередь позволяет непрерывно отслеживать и держать под контролем систематическую погрешность при измерении светимости коллайдера.

**Детектор КМД-3. Критерии отбора событий  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ .** На рис. 1 представлен общий вид детектора, основными элементами которого являются центральная дрейфовая камера (ДК), помещенная в магнитное поле 1,3 Тл и электромагнитный калориметр, состоящий из трех частей. Цилиндрическая часть состоит из двух систем: жидкоксеренового калориметра LXe общей толщиной 5,1 радиационных длин (5.1 X0) и калориметра на основе кристаллов йодида цезия CsI (8.3 X0). В торцах фланцев ДК расположен калориметр на основе кристаллов германата висмута BGO толщиной 13,4 X0. Снаружи детектор покрыт мюонными счетчиками для подавления космического фона. Более подробное описание детектора можно найти в работе [4].

Характерная сигнатура событий искомого процесса – два неколлинеарных трека, летящих из места взаимодействия пучков. Для отбора сигнальных событий использовались следующие критерии отбора:

- 1) сработал заряженный триггер;
- 2) наличие одной вершины с двумя треками противоположных знаков в дрейфовой камере;

<sup>1</sup> Grange J., Guarino V., Winter P., Wood K., Zhao H., Carey R. M., Gastler D., Hazen E., Kinnaird N., Miller J. P., Mott J. [et al. Muon g-2 Collaboration]. Muon (g-2) Technical Design Report. URL: <https://arxiv.org/abs/1501.06858> (date of access: 15.10.2020).

<sup>2</sup> Там же.

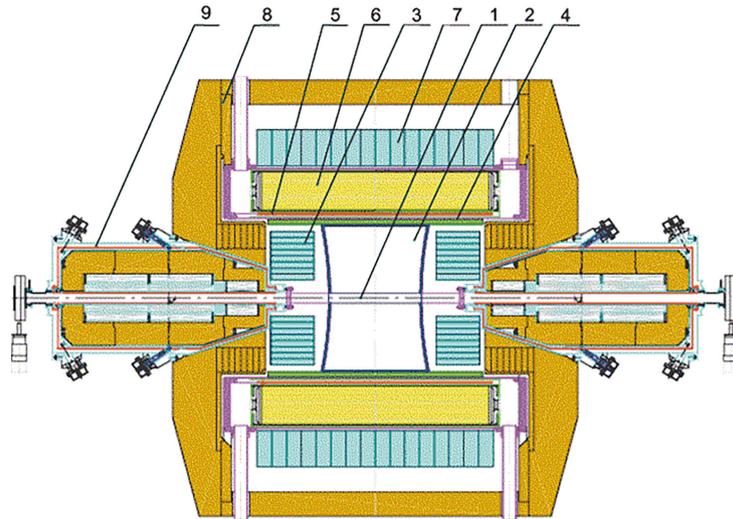


Рис 1. Криогенный магнитный детектор КМД-3: 1 – вакуумная камера; 2 – дрейфовая камера; 3 – калориметр BGO; 4 – Z-камера; 5 – сверхпроводящий соленоид; 6 – жидкоксерононовый калориметр; 7 – калориметр CsI; 8 – ярмо магнита; 9 – соленоиды ВЭПП-2000

Fig 1. The Cryogenic Magnetic Detector (CMD-3): 1 – vacuum chamber; 2 – drift chamber; 3 – endcap BGO calorimeter; 4 – Z-chamber; 5 – superconducting solenoid; 6 – Liquid Xenon calorimeter; 7 – CsI calorimeter; 8 – yoke; 9 – VEPP-2000 solenoid

- 3) число точек на каждом треке  $\geq 10$ ;
- 4)  $|Z_{\text{vert}}| \leq 10$  см – положение вершины вдоль оси пучков;
- 5)  $\rho_{\text{vert}} \leq 10$  см – расстояние вершины двух треков до оси пучков;
- 6)  $|\Delta\varphi| = |\pi - |\varphi_1 - \varphi_2|| \geq 0,25$  рад – угол расколлинearности треков в плоскости, перпендикулярной оси пучков;
- 7)  $\begin{cases} 1 \leq \theta_1 \leq \pi - 1 \\ 1 \leq \theta_2 \leq \pi - 1 \end{cases}$  – условия попадания треков в телесный угол, обеспечивающий высокую эффективность реконструкции треков в дрейфовой камере;
- 8)  $P_{1,2} \geq 90$  МэВ/с – минимальный импульс трека;
- 9)  $0,35 \leq \frac{(P_1 + P_2)}{2E_{\text{beam}}}$  – средний импульс, нормированный на энергию пучков в с.д.м.;
- 10)  $\Psi \geq 0,1$  рад – минимальный угол между недостающим импульсом и кластером, «пришитым» к треку;
- 11)  $M_{\text{inv}} < 1,66E_{\text{beam}}$  – инвариантная масса двух заряженных частиц.

Данный анализ основан на использовании информации с трековой системы детектора КМД-3, которая обладает высокой эффективностью регистрации заряженных частиц. На рис. 2 после всех кинематических отборов приведено распределение (моделирование) сигнальных событий в зависимости от квадрата недостающей массы  $M_{\text{miss}}^2$  двух треков в предположении, что все пары частиц являются пионами:

$$M_{\text{miss}}^2 = (2E_{\text{beam}} - E_1 - E_2)^2 - (\vec{P}_1 + \vec{P}_2)^2, \quad (1)$$

где  $E_i = \sqrt{P_i^2 + m_\pi^2}$ ,  $\vec{P}_i$ ,  $i = 1, 2$  – энергия и импульс  $i$ -й частицы в предположении, что она является  $\pi^+$  или  $\pi^-$ .

Из рис. 2 видно, что отобранные события группируются вокруг квадрата массы нейтрального пиона. На этом этапе форма распределения аппроксимируется суммой четырех функций Гаусса и фиксируется. В дальнейшем эта форма используется для определения числа сигнальных событий в эксперименте.

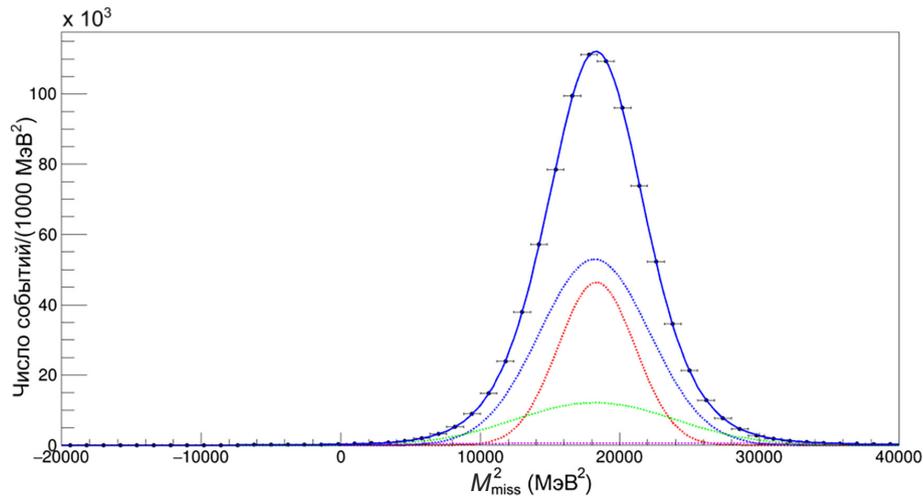


Рис. 2. Моделирование сигнальных событий. Квадрат недостающей массы двух трековых событий сигнала в предположении, что обе частицы пионы. Энергия в с.ц.м.  $E_{c.m.} = 781,04$  МэВ

Fig. 2. The squared missing mass distribution for charged particles from simulated signal events at  $E_{c.m.} = 781.04$  MeV. Both charged particles are assumed to be pions

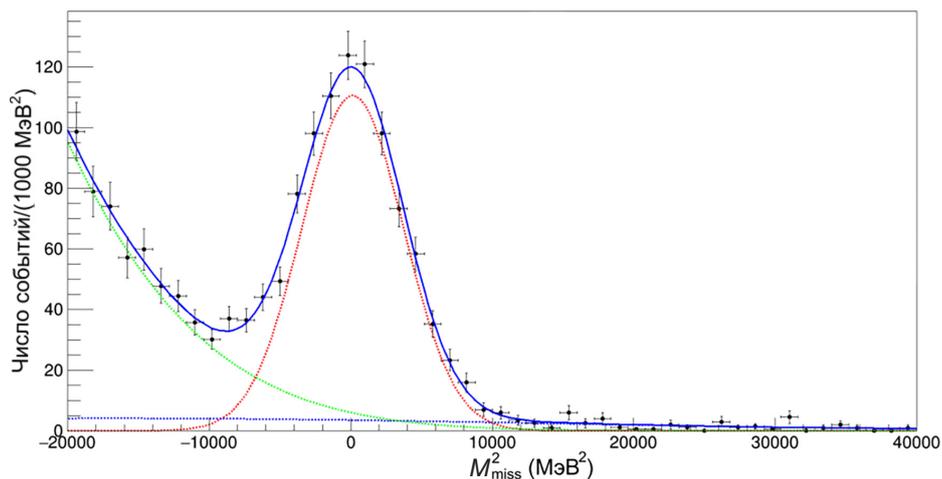


Рис. 3. Моделирование. Квадрат недостающей массы двух треков в предположении, что обе частицы пионы. Представлена сумма трех фоновых процессов в соответствии с их сечениями. Энергия в с.ц.м.  $E_{c.m.} = 781,04$  МэВ. Пунктирные линии: красная – события  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ ; зеленая – события  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ ; синяя – события  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ . Синяя сплошная кривая – результирующая форма распределения фоновых процессов

Fig. 3. The squared missing mass distribution for charged particles from simulated background events at  $E_{c.m.} = 781.04$  MeV. Both charged particles are assumed to be pions. The sum of three background processes in accordance with their cross sections is presented. The dashed lines correspond to: red –  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  events; green –  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  events; blue –  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  events. The solid blue curve is the resulting curve of the background processes

**Оценка фона. Определение числа событий.** В области энергий возле пика  $\omega$ -мезона, фоновыми процессами (рис. 3), которые могут удовлетворять критериям отбора, являются  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ ,  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ ,  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ . В пике  $\omega$ -мезона, т. е. на энергии  $\sim 782$  МэВ, упомянутые выше фоновые процессы имеют соответственно следующие сечения:  $\sim 800$ ,  $\sim 1300$ ,  $\sim 80$  нб. Подавление физического фона происходит прежде всего за счет условия отбора только неколлинеарных треков. В то же время, как показало моделирование, относительная доля коллинеарных событий  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ ,  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ ,  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  после кинематических отборов составила 0,3; 0,1; 0,9 % соответственно. В дальнейшем эти события вычитались в соответствии с их сечениями.

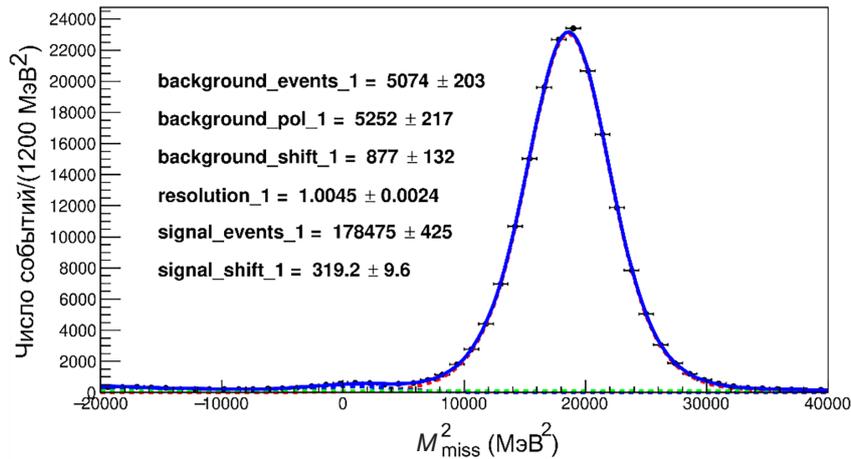


Рис. 4. Эксперимент. Квадрат недостающей массы двух треков в предположении, что обе частицы пионы. Энергия в с.ц.м.  $E_{c.m.} = 781,04$  МэВ

Fig. 4. The squared missing mass distribution for charged particles for data at  $E_{c.m.} = 781.04$  MeV. Both charged particles are assumed to be pions

После определения функций, описывающих форму сигнала и фона, их параметры фиксировались, и экспериментальные данные аппроксимировались суммой полученных функций. Однако ширина моделированных распределений увеличивалась на несколько процентов, чтобы описать экспериментальные распределения, которые реально немного более широкие (3–5 %). Кроме того, для функций сигнала и фона использовались два независимых сдвига положения «средних». В итоге результирующая функция аппроксимации имела 6 свободных параметров: число событий сигнала, число событий физического фона, число событий равномерно распределенного пучкового фона, сдвиг сигнала, сдвиг фона и разрешение (коэффициент уширения моделированных спектров). На рис. 4 в качестве примера приведена подгонка в точке с наибольшей светимостью ( $E_{c.m.} = 781,04$  МэВ). Слева от пика виден незначительный вклад от физического фона: вблизи нуля вклад от событий  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  и  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ , а в районе  $-20\,000$  МэВ<sup>2</sup> – события  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ . В итоге вклад физического и пучкового фона не превышает 5 %.

Определение числа сигнальных событий основано на аппроксимации распределения по квадрату недостающей массы с помощью библиотек RooFit [8], которые предоставляют набор инструментов для моделирования ожидаемого распределения событий в физическом анализе. Форма сигнала для каждой точки по энергии фиксировалась из моделирования и аппроксимировалась суммой четырех функций Гаусса (см. рис. 2). Форма физического фона также фиксировалась из моделирования и аппроксимировалась суммой трех Гауссов (см. рис. 3). Пучковый фон описывался дополнительной равномерной подложкой.

**Результаты.** После определения числа полезных событий вычислялось видимое сечение:

$$\sigma_{\text{vis}} = \frac{N_{\text{sel}}}{L \varepsilon_{MC} (1 + \delta_{\text{trig}})(1 + \delta_{\text{track}})}, \quad (2)$$

где  $N_{\text{sel}}$  – число отобранных событий,  $L$  – интеграл светимости,  $\varepsilon_{MC}$  – эффективность регистрации событий (моделирование),  $\delta_{\text{trig}}$  – поправка к эффективности триггера (лучше 99 % и в дальнейшем не обсуждается),  $\delta_{\text{track}}$  – поправка на эффективность реконструкции трека в ДК.

Эффективность регистрации сигнальных событий изучаемого процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  детектором КМД-3 была определена с использованием пакета программ CMD3SIM, разработанной на основе пакета GEANT4 и составляет ~10 % (рис. 5). События моделирования обрабатывались тем же пакетом программ, что и экспериментальные данные с учетом всех критериев отбора.

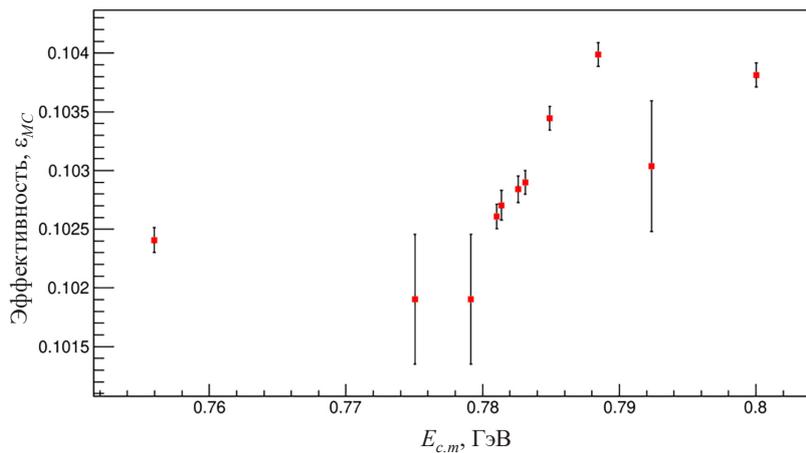


Рис. 5. Эффективность регистрации событий сигнала в зависимости от энергии в с.ц.м.

Fig. 5. The detection efficiency dependence on the c.m. energy

Для определения поправки к эффективности реконструкции отбирались тестовые события с одним и двумя треками, в которых зарегистрированы два фотона от распада нейтрального пиона, инвариантная масса которых лежит в диапазоне  $\pm 20$  МэВ вокруг массы нейтрального пиона. Далее поправка определялась следующим образом:

$$1 + \delta_{\text{track}} = \frac{\epsilon_{\text{exp}}^+ \epsilon_{\text{exp}}^-}{\epsilon_{\text{MC}}^+ \epsilon_{\text{MC}}^-}, \quad (3)$$

где  $\epsilon_{\text{exp}}^+$ ,  $\epsilon_{\text{exp}}^-$  – эффективности регистрации положительно и отрицательно заряженных треков, вычисленных по экспериментальным данным по формуле

$$\epsilon_{\text{exp}}^{\pm} = \frac{1}{1 + \frac{N_{1tr}^{\pm}}{N_{2tr}}}, \quad (4)$$

где  $N_{1tr}^{\pm}$  – количество событий с одним треком и положительным / отрицательным зарядом. На рис. 6 представлены результаты вычисления поправки к эффективности реконструкции двух треков в дрейфовой камере в зависимости от энергии в системе центра масс, которая в среднем составляет порядка 3,5 %.

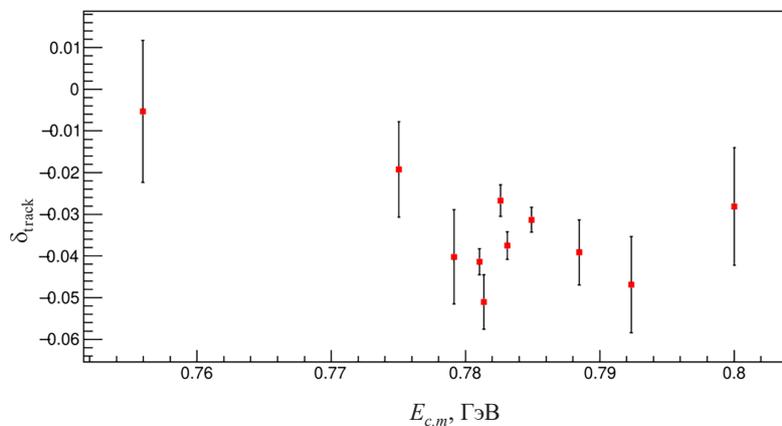


Рис. 6. Поправка на эффективность реконструкции двух треков в дрейфовой камере,  $\delta_{\text{track}}$

Fig. 6. The track reconstruction efficiency correction coefficient,  $\delta_{\text{track}}$

В настоящее время продолжается анализ систематических ошибок. Основными источниками систематической погрешности являются: неточность измерения светимости, которая оценивается на уровне 1,5–2,5 %; неточность измерения энергии пучков коллайдера ВЭПП-2000 и разброс энергии в пучке также дает вклад в неточность измерения сечения на уровне 1 %; вариации критериев отбора меняют сечения изучаемого процесса внутри коридора на уровне  $\sim \pm 1$  %. Кроме того, мы оцениваем неточность поправок на распад пионов и их ядерное взаимодействие с веществом детектора не более чем 1 %. В итоге при консервативном сложении этих погрешностей наши текущие результаты измерения сечения имеют систематическую ошибку порядка 5 %.

Борновское сечение и значения параметров  $\omega$ -мезона определялись решением интегрального уравнения

$$\sigma_{\text{vis}}(s) = \int_0^{x_0} dx \sigma_{\text{born}}(s(1-x))F(x,s), \tag{5}$$

где  $s = 4E_{c.m.}^2$ ,  $x_0$  – определяется порогом реакции,  $1 - \frac{s_{\text{пор}}}{s}$ ,  $F(x,s)$  – функция Кураева – Фадына [9], учитывающая излучение многих фотонов в коллинеарной области. Полученное сечение аппроксимировалось функцией, вычисленной в рамках модели векторной доминантности (МВД) для механизма распада через  $\rho - \pi$  с учетом  $(\omega - \phi)$ -интерференции [5]:

$$\sigma(s) = \frac{F_{\pi^+\pi^-\pi^0}(s)}{s^{3/2}} \left| \sum_{V=\omega,\phi} e^{i\phi_{\omega V}} \sqrt{\frac{\sigma(V \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)M_V}{F_{\pi^+\pi^-\pi^0}(M_V^2)}} \frac{\Gamma_V M_V^2}{D_V(s)} \right|^2, \tag{6}$$

где  $F_{\pi^+\pi^-\pi^0}(s)$  – фазовый объем системы трех пионов, численно рассчитанный в механизме  $\rho - \pi$ ;  $\sigma(V \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)$ ,  $M_V$ ,  $\Gamma_V$  – сечение в пике, масса и полная ширина векторного мезона  $V$  соответственно,  $D_V(s) = M_V^2 - s - i\sqrt{s}\Gamma_V(s)$ .

Параметры  $\phi$ -мезона брались из справочника (PDG) и фиксировались. Во время минимизации программой MINUIT варьировались три параметра:  $\sigma(V \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)$ ,  $M_V$ ,  $\Gamma_V$ . Результаты аппроксимации представлены на рис. 7, они согласуются с результатами предыдущих измерений и имеют сопоставимую точность (таблица).

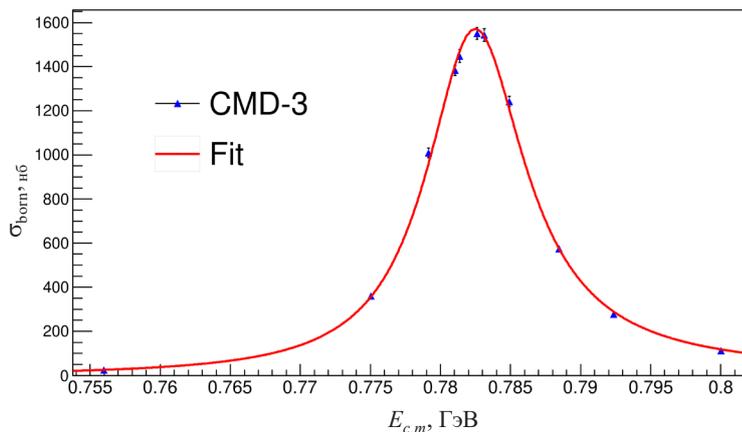


Рис. 7. Аппроксимация борновского сечения  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  в области энергий  $\omega$ -мезона. Точками представлены данные CMD-3, кривой – результат их аппроксимации

Fig. 7. Fit to the Born cross section of  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  in the energy range of the  $\omega$ -meson. Dots are the CMD-3 data obtained in this work and the curve is the fit result

## Сравнение результатов измерения с другими экспериментами

## Comparison of the results of measurement with another experiments

Детектор	$M_\omega$ , МэВ	$\Gamma_\omega$ , МэВ	$\sigma_0(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)$ , нб
КМД-2	$782,71 \pm 0,07 \pm 0,04$	$8,68 \pm 0,23 \pm 0,10$	$1482 \pm 23 \pm 25$
СНД	$782,79 \pm 0,08 \pm 0,09$	$8,60 \pm 0,04 \pm 0,15$	$1615 \pm 9 \pm 57$
КМД-3	$782,70 \pm 0,02 \pm 0,11$	$8,74 \pm 0,05 \pm 0,22$	$1545 \pm 4 \pm 39$

**Заключение.** В работе представлены предварительные результаты измерения борновского сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  в области  $\omega$ -мезона, параметры которого измерены с точностью лучше предыдущих экспериментов. Ведется анализ систематических ошибок, вклад которых на текущий момент оценивается на уровне 5 %. Детектор КМД-3 в области энергий  $\omega$ -мезона набрал интегральную светимость порядка  $40 \text{ пб}^{-1}$ , анализ которой позволит значительно улучшить точность измерения сечений и параметров  $\omega$ -мезона.

**Благодарности.** Авторы работы выражают благодарность коллективу ВЭПП-2000 за обеспечение отличной работы комплекса во время набора статистики. Работа поддержана грантами Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (№ Ф20Р-053) и Российского фонда фундаментальных исследований (№ 20-52-00008 Бел\_а).

**Acknowledgements.** The authors would like to express their sincere gratitude to the VEPP-2000 team for ensuring excellent operation of the complex during the data-taking run. The work was supported by grants of the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (no. F20R-053) and the Russian Foundation for Basic Research (no. 20-52-00008 Бел\_а).

## Список использованных источников

1. Updated estimate of the muon magnetic moment using revised results from  $e^+e^-$  annihilation / M. Davier [et al.] // Eur. Phys. J. C. – 2003. – Vol. 31, № 4. – P. 503–510. <https://doi.org/10.1140/epjc/s2003-01362-6>
2. Precise Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment / H. N. Brown [et al. Muon (g-2) Collaboration] // Phys. Rev. Lett. – 2001. – Vol. 86, № 11. – P. 2227–2231. [https://doi.org/10.1142/9789812701909\\_0003](https://doi.org/10.1142/9789812701909_0003)
3. A new approach for measuring the muon anomalous magnetic moment and electric dipole moment / M. Abe [et. al.] // Prog. Theor. Exp. Phys. – 2019. – Vol. 5, № 5. – P. 053C02.
4. Khazin, B. I. Physics and Detectors for VEPP-2000 / B. I. Khazin // Nucl. Phys. B – Proc. Supplements. – 2008. – Vol. 181/182. – P. 376–380. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2008.09.068>
5. Study of the process  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  in the energy region below 0.98 GeV / M. N. Achasov [et al.] // Phys. Rev. D. – 2003. – Vol. 68, № 5. – P. 052006–052006-20.
6. Measurement of  $\omega$  meson parameters in  $\pi^+\pi^-\pi^0$  decay mode with CMD-2 / R. R. Akhmetshin [et al.] // Phys. Lett. B. – 2000. – Vol. 376, № 1/2. – P. 33–39. [https://doi.org/10.1016/s0370-2693\(00\)00123-4](https://doi.org/10.1016/s0370-2693(00)00123-4)
7. Backscattering of Laser Radiation on Ultrarelativistic Electrons in a Transverse Magnetic Field: Evidence of MeV-Scale Photon Interference / E. V. Abakumova [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2010. – Vol. 110, № 14. – P. 140402. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.110.140402>
8. Verkerke, W. The RooFit toolkit for data modeling [Electronic resource] / W. Verkerke, D. Kirkby. – Mode of access: <https://arxiv.org/abs/physics/0306116>. – Date of access: 15.10. 2020.
9. Kuraev, E. A. On Radiative Corrections to  $e^+e^-$  Single Photon Annihilation at High-Energy / E. A. Kuraev, V. S. Fadin // Sov. J. Nucl. Phys. – 1985. – Vol. 41. – P. 466–472.

## References

1. Davier M., Eidelman S., Hoecker A., and Zhang Z. Updated estimate of the muon magnetic moment using revised results from  $e^+e^-$  annihilation. *The European Physical Journal C*, 2003, vol. 31, no. 4, pp. 503–510. <https://doi.org/10.1140/epjc/s2003-01362-6>
2. Brown H. N., Bunce G., Carey R. M., Cushman P., Danby G. T., Debevec P. T., Deile M., Deng H., Deninger W., Dhawan S. K., Druzhinin V. P. [et al. Muon (g-2) Collaboration]. Precise Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment. *Physical Review Letters*, 2001, vol. 86, no. 11, pp. 2227–2231. [https://doi.org/10.1142/9789812701909\\_0003](https://doi.org/10.1142/9789812701909_0003)
3. Abe M., Bae S., Beer G., Bunce G., Choi H., Choi S., Chung M., da Silva W., Eidelman S., Finger M., Fukao Y. [et. al.] A new approach for measuring the muon anomalous magnetic moment and electric dipole moment. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2019, vol. 5, no. 5, pp. 053C02.
4. Khazin B. I. Physics and Detectors for VEPP-2000. *Nuclear Physics B – Proceedings Supplements*, 2008, vol. 181–182, pp. 376–380. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2008.09.068>
5. Achasov M. N., Beloborodov K. I., Berdyugin A. V., Bogdanchikov A. G., Bozhenok A. V., Bukin A. D., Bukin D. A. [et al.]. Study of the process  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  in the energy region below 0.98 GeV. *Physical Review D*, 2003, vol. 68, no. 5, pp. 052006–052006-20.

6. Akhmetshin R. R., Anashkin E. V., Aulchenko V. M., Banzarov V. Sh., Barkov L. M., Baru S. E., Bashtovoy N. S., Bondar A. E., Bondarev D. V., Chernyak D. V., Eidelman S. I., Fedotov G. V., Gabyshev N. I., Grebeniuk A. A., Grigoriev D. N. [et al.]. Measurement of  $\omega$  meson parameters in  $\pi^+\pi^-\pi^0$  decay mode with CMD-2. *Physics Letters B*, 2000, vol. 376, no. 1–2, pp. 33–39. [https://doi.org/10.1016/s0370-2693\(00\)00123-4](https://doi.org/10.1016/s0370-2693(00)00123-4)

7. Abakumova E. V., Achasov M. N., Berkaev D. E., Kaminsky V. V., Muchnoi N. Yu., Perevedentsev E. A., Pyata E. E., Shatunov Yu. M. Backscattering of Laser Radiation on Ultrarelativistic Electrons in a Transverse Magnetic Field: Evidence of MeV-Scale Photon Interference. *Physical Review Letters*, 2010, vol. 110, no. 14, pp. 140402. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.110.140402>

8. Verkerke W., Kirkby D. *The RooFit toolkit for data modeling*. Available at <https://arxiv.org/abs/physics/0306116> (Accessed 15 October 2020).

9. Kuraev E. A., Fadin V. S. On Radiative Corrections to  $e^+e^-$  Single Photon Annihilation at High-Energy. *Soviet Journal of Nuclear Physics*, 1985, vol. 41, pp. 466–472.

### Информация об авторах

**Василевская Дарья Сергеевна** – младший научный сотрудник, Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: [d.vasilevskaya@dragon.bas-net.by](mailto:d.vasilevskaya@dragon.bas-net.by), <https://orcid.org/0000-0002-1193-5237>

**Григорьев Дмитрий Николаевич** – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Российская Федерация), заведующий лабораторией, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, г. Новосибирск, Российская Федерация), доцент, Новосибирский государственный технический университет (пр. К. Маркса, 20, 630073, г. Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: [d.n.grigoriev@inp.nsk.su](mailto:d.n.grigoriev@inp.nsk.su)

**Дудко Игорь Георгиевич** – научный сотрудник, Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: [igordudko89@gmail.com](mailto:igordudko89@gmail.com)

**Иванов Вячеслав Львович** – научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, г. Новосибирск, Российская Федерация), преподаватель кафедры общей физики, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: [vyacheslav\\_lvovich\\_ivanov@mail.ru](mailto:vyacheslav_lvovich_ivanov@mail.ru)

**Казанин Василий Федорович** – старший научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, г. Новосибирск, Российская Федерация), старший преподаватель кафедры общей физики, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: [v.kazanine@mail.ru](mailto:v.kazanine@mail.ru)

**Козырев Алексей Николаевич** – научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, г. Новосибирск, Российская Федерация), преподаватель кафедры общей физики, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: [AKozyrev@inp.nsk.su](mailto:AKozyrev@inp.nsk.su)

**Рубан Александр Анатольевич** – старший научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, г. Новосибирск, Российская Федерация), преподаватель кафедры общей физики, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: [ruban@inp.nsk.su](mailto:ruban@inp.nsk.su)

### Information about the authors

**Darya S. Vasileuskaya** – Junior Researcher, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [d.vasilevskaya@dragon.bas-net.by](mailto:d.vasilevskaya@dragon.bas-net.by). <https://orcid.org/0000-0002-1193-5237>

**Dmitry N. Grigoriev** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory, Novosibirsk State University (2, Pirogova Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation), Head of the Laboratory, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Akademika Lavrentieva Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation), Assistant Professor, Novosibirsk State Technical University, (20, K. Marksa Ave., 630073, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: [d.n.grigoriev@inp.nsk.su](mailto:d.n.grigoriev@inp.nsk.su)

**Igor G. Dudko** – Researcher, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [igordudko89@gmail.com](mailto:igordudko89@gmail.com)

**Vyacheslav L. Ivanov** – Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Akademika Lavrentieva Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation), Assistant Professor, Novosibirsk State University (2, Pirogova Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: [vyacheslav\\_lvovich\\_ivanov@mail.ru](mailto:vyacheslav_lvovich_ivanov@mail.ru)

**Vasily F. Kazanin** – Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Akademika Lavrentieva Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation), Assistant Professor, Novosibirsk State University (2, Pirogova Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: [v.kazanine@mail.ru](mailto:v.kazanine@mail.ru)

**Aleksey N. Kozyrev** – Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Akademika Lavrentieva Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation), Assistant Professor, Novosibirsk State University (2, Pirogova Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: [AKozyrev@inp.nsk.su](mailto:AKozyrev@inp.nsk.su)

**Aleksandr A. Ruban** – Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Akademika Lavrentieva Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation), Assistant Professor, Novosibirsk State University (2, Pirogova Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: [ruban@inp.nsk.su](mailto:ruban@inp.nsk.su)

**Artem E. Ryzhenkov** – Junior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the

**Рыжененков Артем Евгеньевич** – младший научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, г. Новосибирск, Российская Федерация), старший преподаватель кафедры общей физики, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Российская Федерация).  
E-mail: a.e.ryzhenenkov@inp.nsk.su

**Толмачев Сергей Сергеевич** – аспирант, старший лаборант, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, г. Новосибирск, Российская Федерация).  
E-mail: s.s.tolmachev@inp.nsk.su

**Федотович Геннадий Васильевич** – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, г. Новосибирск, Российская Федерация), профессор, заведующий кафедрой физики ФФ и СУНЦ НГУ, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: fedotovich@inp.nsk.su

**Шемякин Дмитрий Николаевич** – научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, г. Новосибирск, Российская Федерация), старший преподаватель кафедры общей физики, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: dimnsh@yandex.ru

**Шёлковый Дмитрий Викторович** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: shoukavy@ifanbel.bas-net.by

**Эпштейн Леонид Борисович** – научный сотрудник, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Российская Федерация), научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, г. Новосибирск, Российская Федерация); старший преподаватель, Новосибирский государственный технический университет (пр. К. Маркса, 20, 630073, г. Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: l.b.epshteyn@inp.nsk.su

Russian Academy of Sciences (11, Akademika Lavrentieva Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation), Senior Lecturer, Novosibirsk State University (2, Pirogova Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation).

E-mail: a.e.ryzhenenkov@inp.nsk.su

**Sergey S. Tolmachev** – Postgraduate Student, Senior Laboratory Assistant, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Akademika Lavrentieva Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation), E-mail: s.s.tolmachev@inp.nsk.su

**Gennady V. Fedotovich** – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Chief Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Akademika Lavrentieva Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation), Professor, Head of the Department, Novosibirsk State University (2, Pirogova Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation).

E-mail: v.kazanine@mail.ru

**Dmitry N. Shemyakin** – Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Akademika Lavrentieva Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation), Assistant Professor, Novosibirsk State University (2, Pirogova Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: dimnsh@yandex.ru

**Dzmitry V. Shoukavy** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shoukavy@ifanbel.bas-net.by

**Leonid B. Epshteyn** – Researcher, Novosibirsk State University (2, Pirogova Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation), Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Akademika Lavrentieva Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation), Senior Lecturer, Novosibirsk State Technical University (20, K. Marks Ave., 630073, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: l.b.epshteyn@inp.nsk.su