

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

УДК 539.11

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$
 В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИИ $1 < \sqrt{s} < 2$ ГэВ С ДЕТЕКТОРОМ СНД

© 2013 г. М. Н. Ачасов*,**, К. И. Белобородов*,**, А. В. Бердюгин*, А. Г. Богданчиков*,
 А. А. Ботов*, А. В. Васильев*,**, В. Б. Голубев*,**, Т. В. Димова*,**, В. П. Дружинин*,**,
 Д. П. Коврижин*, И. А. Кооп*,**, А. А. Король*,**, С. В. Кошуба*, А. Е. Образовский*,**,
 Е. В. Пахтусова*, С. И. Середняков*,**, З. К. Силагадзе*,**, А. Г. Харламов*,**,¹,
 Ю. М. Шатунов*, Л. В. Кардапольцев*,**, А. С. Купич*,**, К. А. Мартин*, К. А. Гревцов*,**,
 И. К. Сурин*, К. Ю. Сквепень*, Д. А. Штоль*, А. Н. Скринский*, Ю. А. Тихонов*,**,
 Ю. В. Усов*, А. Ю. Барняков*, Д. Е. Беркаев*,**, Д. Б. Шварц*,
 Ю. А. Роговский*,**, А. С. Касаев*, А. Н. Кирпотин*

*Институт Ядерной Физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск

**Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск

¹e-mail: A.G.Kharlamov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 30.05.2013 г.

В эксперименте с детектором СНД на e^+e^- коллайдере ВЭПП-2000 измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$, в интервале энергии $\sqrt{s} = 1000\text{--}2000$ МэВ. Статистическая точность измерения составила 1–2%, систематическая неопределенность – менее 10%. В области энергии $\sqrt{s} = 1400\text{--}2000$ МэВ сечение измерено впервые. При исследовании структуры конечного состояния выделен процесс $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$.

Ключевые слова: ВЭПП-2000, СНД, векторные мезоны.

DOI: 10.1134/S2079562913090017

1. ВВЕДЕНИЕ

Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ в области энергии $1 < \sqrt{s} < 2$ ГэВ определяется переходом векторных мезонов $V(\rho, \rho', \rho'')$ в состояние $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$. Основными промежуточными механизмами являются $\omega\pi^0$ и $a_1\pi, \rho\rho, f_0\rho$: Соответствующие этим процессам диаграммы изображены на рис. 1.

В данной области энергии сечение $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ доминирует в полном сечении e^+e^- аннигиляции в адроны и вносит значительный вклад в поляризацию вакуума адронами [1].

Сечение процессов $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0, e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ в диапазоне энергий 0.98–1.38 ГэВ измерено с точностью ~8% в работе [2].

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Детектор СНД [3] работает с 2009 года на коллайдере ВЭПП-2000 [4] в энергетическом диапазоне 360–2000 МэВ. Детектор включает в себя несколько подсистем. Трековая система представляет собой дрейфовую камеру с ячейкой струйного типа. Трехслойный электромагнитный калориметр на основе кристаллов NaI(Tl). В состав мюонной систе-

мы входят сцинтилляционные счетчики и 2 слоя стримерных трубок. Энергетическое и пространственное разрешения калориметра зависят от энергии фотонов следующим образом: $\sigma_E/E(\%) = 4.2\%/ \sqrt[4]{4E(\text{ГэВ})}$ и $\sigma_{\phi,0} = 0.82^\circ/\sqrt{E(\text{ГэВ})} \oplus 0.63^\circ$. Разрешение трековой системы составляет 0.5° и 2° для азимутального и полярного углов соответственно.

В данном анализе использовалась статистика двух экспериментов: Mhad10 и Mhad11, набранная в 2010–2011 годах. Интегральная светимость в эксперименте Mhad10 составила 5 пб^{-1} , в эксперименте Mhad11–25 пб^{-1} . Интегральная светимость измерялась двумя независимыми способами: по событиям электрон-позитронного рассеяния и аннигиляции в два фотона. Систематическая неопределенность светимости оценивалась по разности этих двух измерений и составила ~2%.

Эксперименты проводились методом сканирования энергетического диапазона.

3. ОТБОР СОБЫТИЙ

Во время эксперимента первичный триггер выбирал события с энерговыделением в калори-

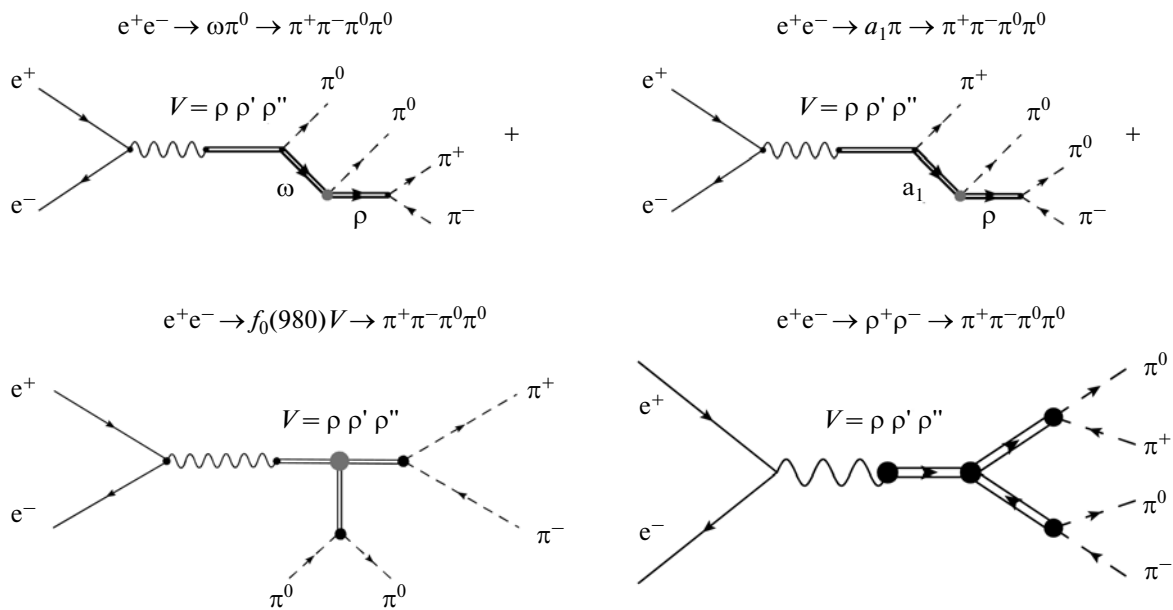


Рис. 1. Диаграммы для процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$.

метре более 100 МэВ и одним и более треками в дрейфовой камере. При реконструкции на записанные события накладывались условия так называемого “вычисленного триггера”, которые являются немного более “жесткими”, чем экспериментальные условия отбора триггера. Такая процедура позволяет избежать неопределенностей, связанных с работой электроники. При определении эффективности регистрации на события моделирования также накладываются условия “вычисленного триггера”.

Для анализа отбирались события удовлетворяющие следующим условиям:

2 или более заряженных трека;

4 или более реконструированных фотона;

расстояние от оси пучков до любого из треков в R - ϕ плоскости $\rho < 1$ см;

$|Z| < 10$ см, где Z – координата пересечения трека с осью пучков.

Условие на координату Z определяются размером места встречи. Условие на расстояние ρ определяется разрешением дрейфовой камеры. Оба условия служат для подавления событий пучкового фона и космических мюонов. Продольный раз-

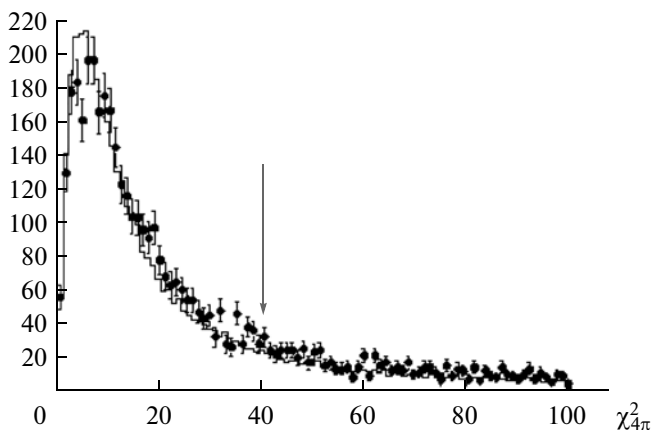


Рис. 2. Распределение по параметру $\chi^2_{4\pi}$ для событий моделирования (гистограмма) и экспериментальных данных (точки) энергия $2E = 1500$ МэВ, отобрано 8334 события. Стрелкой показано условие отбора.

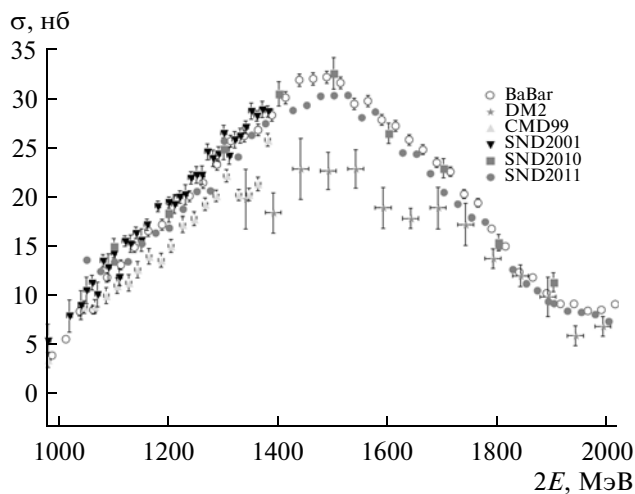


Рис. 3. Измеренное сечение реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ в сравнении с результатами других экспериментов.

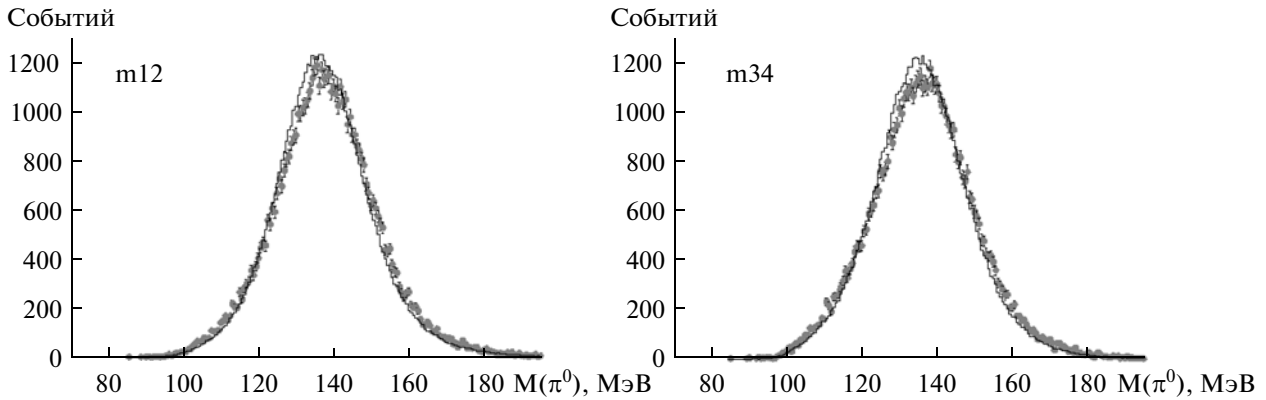


Рис. 4. Распределение по массе π^0 -мезонов после реконструкции в модели $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$. Точки с ошибками – экспериментальное распределение, гистограмма – моделирование.

мер места встречи зависит от энергии пучков и менялся в эксперименте от 2 до 2.5 см.

Для отобранных в указанных условиях событий проводилась процедура кинематической реконструкции в гипотезах:

$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0,$$

$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-4\gamma.$$

Для формирования π^0 -мезонов перебирались все возможные комбинации фотонов в событии, и выбиралась комбинация с минимальным значением χ^2 -реконструкции. Такая процедура позволяет отбросить “ложные” фотоны, образующиеся за счет ядерного взаимодействия π -мезонов с веществом или за счет пучкового фона. Инвариантная масса π^0 -мезонов показана на рис. 4.

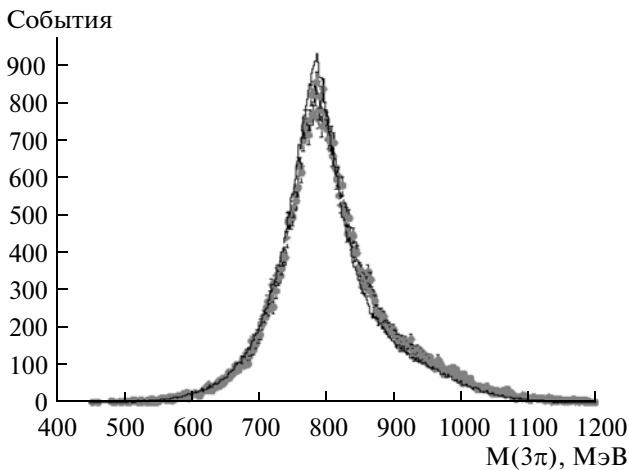


Рис. 5. Распределение по параметру $M_{3\pi}$ – масса системы 3-х π -мезонов в реконструкции $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ наиболее близкая к массе ω -мезона. Точки с ошибками – экспериментальные данные, гистограмма – моделирование.

Далее накладывалось дополнительное условие отбора на χ^2 -реконструкции: $\chi^2_{4\pi} < 40$. Данное условие отбора выработано по моделированию (см. рис. 2). Всего отобрано 152920 событий.

4. СЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА И РАЗДЕЛЕНИЕ ЕГО МЕХАНИЗМОВ

Эффективность регистрации определялась методом Монте-Карло и слабо зависит от энергии. Среднее значение эффективности регистрации во всем диапазоне энергии для промежуточного состояния $a_1\pi$ равно $33.5 \pm 0.4 \%$, а для промежуточного состояния $\omega\pi^0$ – 32.5 ± 1.4 . Разница в эф-

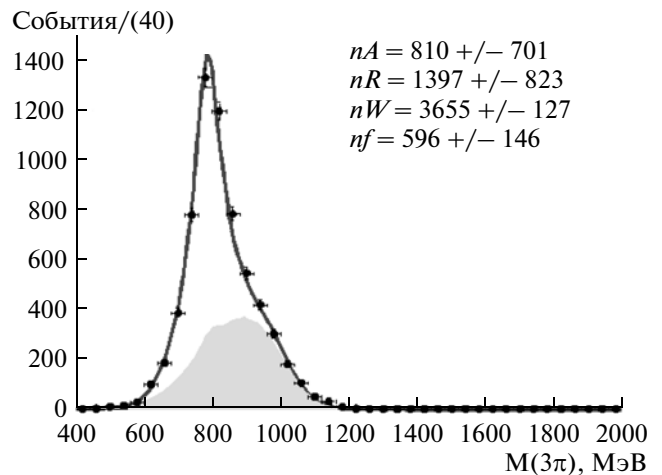


Рис. 6. Распределение по параметру $M_{3\pi}$ – масса системы 3-х π -мезонов в реконструкции $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ наиболее близкая к массе ω -мезона. Точки с ошибками – экспериментальные данные, заштрихованная гистограмма – сумма событий моделирования процессов не- $\omega\pi^0$, линия – аппроксимирующая кривая. Энергия в с.ц.м. 1400 МэВ. nW – число событий сигнала механизма $\omega\pi^0$, nR – число событий механизма $\rho\rho$, nf – число событий механизма $f_0\rho$, nA – число событий механизма $a_1\pi$.

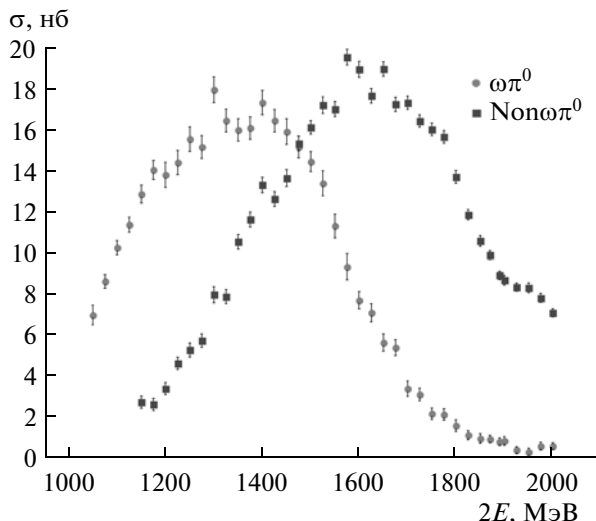


Рис. 7. Измеренное сечение реакции $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ и $e^+e^- \rightarrow \text{не-}\omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$.

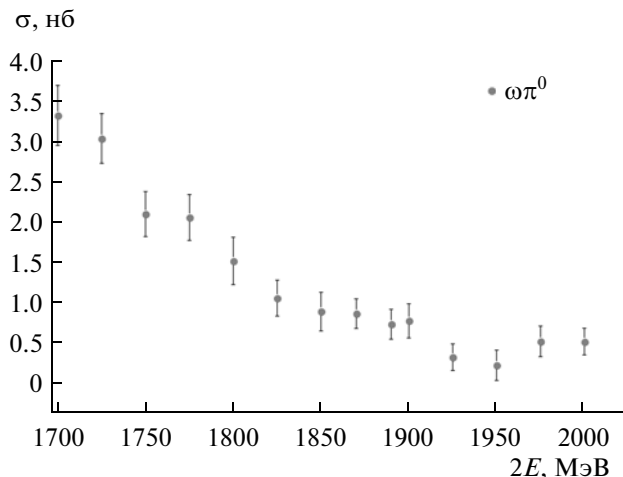


Рис. 8. Измеренное сечение реакции $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ в области порога рождения барион-антибарионных пар.

фективности регистрации для различных механизмов реакции $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$, объясняется различными угловыми распределениями для различных промежуточных состояний.

Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ в каждой точке по энергии определялось по формуле:

$$\sigma(E) = \frac{N_{4\pi}(E)}{IL(E)\epsilon(E)(1 + \delta(E))}, \quad (1)$$

где $N_{4\pi}$ — число зарегистрированных событий искомого процесса, $IL(E)$ — интегральная светимость в данной точке по энергии, ϵ — эффективность регистрации, δ — радиационная поправка. Измеренное сечение изображено на рисунке 3.

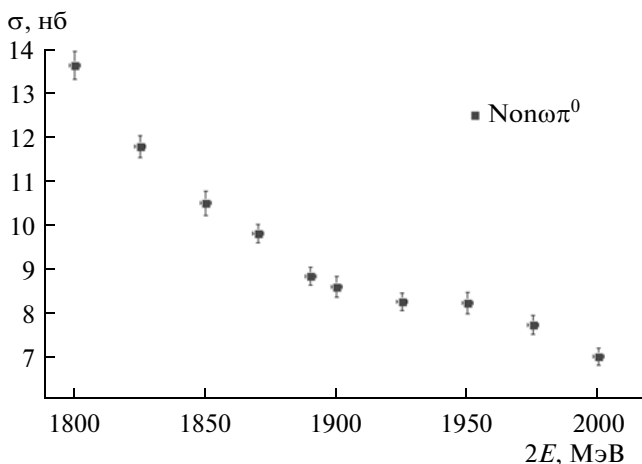


Рис. 9. Измеренное сечение реакции $e^+e^- \rightarrow \text{не-}\omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ в области порога рождения барион-антибарионных пар.

Радиационная поправка вычислялась методом Монте-Карло и плавно менялась с энергией от -0.12 при 1000 МэВ до 0.14 при 2000 МэВ.

Для разделения промежуточных механизмов реакции использовалось распределение по инвариантной массе системы $\pi^+\pi^-\pi^0$, при этом выбиралась комбинация, наиболее близкая по массе к ω -мезону. В области энергии ниже 1400 МэВ распределение по данному параметру хорошо описывается моделированием (рис. 5), в данной области доминирует промежуточный механизм $\omega\pi^0$. Распределение по данному параметру для каждого из механизмов реакции фиксировалось из моделирования с помощью техники ядерных оценок [5]. Для выделения промежуточного механизма $\omega\pi^0$ производилась аппроксимация распределения по инвариантной массе системы $\pi^+\pi^-\pi^0$ четырьмя распределениями с фиксированной формой (рис. 6). Всего было 4 свободных параметра. Сечения рождения $\omega\pi^0$, полученное таким способом и сечение рождения системы $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ за вычетом сечения $\omega\pi^0$ изображены на рис. 7. В области энергии 1900 – 2000 МэВ наблюдается изменение поведения сечения с энергией для промежуточных состояний $\omega\pi^0$ и не- $\omega\pi^0$ см. рис. 8, 9.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В эксперименте с детектором СНД на коллайдере ВЭПП-2000 измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ в интервале энергии $\sqrt{s} = 1000$ – 2000 МэВ. Сечение согласуется с предыдущими измерениями и имеет наилучшую сегодня точность, статистическая неопределенность составляет 1 – 2% , систематическая неопределен-

ность не превышает 10%. В области $\sqrt{s} > 1400$ МэВ данное сечение измерено впервые. Произведено разделение промежуточных механизмов реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$, выделен механизм промежуточного состояния $\omega\pi^0$.

Работа частично поддержана грантами Президента РФ МК-4345.2012.2 и НШ-5320.2012.2, грантами РФФИ 11-02-00276-а, 12-02-00065-а, 12-02-01250-а, 13-02-00418-а, 13-02-00375, 12-02-31515 мол_а, 12-02-31692 мол_а, 12-02-31488 мол_а. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, грант № 14.518.11.7003.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Davier M., Descotes-Genon S. et al.* Eur. Phys. J. C 2008. V. 56. P. 305–322.
2. *Achasov M.N. et al.* J. Exp. Theor. Phys. 2003. V. 96. P. 789.
3. *Achasov M.N. et al.* Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 2000. V. 449. P. 125 (11 July 2000).
4. *Skrinsky A.N.* In Proc. Workshop on Physics and Detectors for DAΦNE. Frascati, Italy. 1995. P. 3.
5. *Cranmer K.S.* Comp. Phys. Com. 2001. V. 136. P. 198.

Study of the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ Process in the Energy Range $1 < \sqrt{s} < 2$ GeV with the SND Detector

M. N. Achasov^{a, b}, K. I. Beloborodov^{a, b}, A. V. Berdyugin^a, A. G. Bogdanchikov^a,
 A. A. Botov^a, A. V. Vasil'ev^{a, b}, V. B. Golubev^{a, b}, T. V. Dimova^{a, b}, V. P. Druzhinin^{a, b},
 D. P. Kovrizhin^a, I. A. Koop^{a, b}, A. A. Korol'^{a, b}, S. V. Koshuba^a, A. E. Obrazovskii^{a, b},
 E. V. Pakhtusova^a, S. I. Serednyakov^{a, b}, Z. K. Silagadze^{a, b}, A. G. Kharlamov^{a, b, *},
 Yu. M. Shatunov^a, L. V. Kardapol'tsev^{a, b}, A. S. Kupich^{a, b}, K. A. Martin^a, K. A. Grevtsov^{a, b},
 I. K. Surin^a, K. Yu. Skovpen'^a, D. A. Shtol'^a, A. N. Skrinskii^a, Yu. A. Tikhonov^{a, b},
 Yu. V. Usov^a, A. Yu. Barnyakov^a, D. E. Berkaev^{a, b}, D. B. Shvarts^a,
 Ya. A. Rogovskii^{a, b}, A. S. Kasaev^a, and A. N. Kirpotin^a

^a *Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Division, Russian Academy of Sciences,
 pr. Akademika Lavrent'eva 11, Novosibirsk, 630090 Russia*

^b *Novosibirsk State University, ul. Pirogova 2, Novosibirsk, 630090 Russia*

**e-mail: A.G.Kharlamov@inp.nsk.su*

Received May 30, 2013

In the experiment with the SND detector at the VEPP-2000 e^+e^- collider, the cross section for the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ process has been measured in the energy range $\sqrt{s} = 1-2$ GeV with a statistical accuracy of 1–2% and a systematic error of less than 10%. The cross section in the energy range $\sqrt{s} = 1.4-2$ GeV has been measured for the first time. The $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ channel has been separated when analyzing the structure of the final state.

Keywords: VEPP-2000, SND, vector mesons