ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 2021, том 84, № 2, с. 124–129

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПОЛЯ

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА РОЖДЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ПИОНОВ В pn-СОУДАРЕНИЯХ В ОБЛАСТИ НАЧАЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ 1140–1670 МэВ/c

© 2021 г. В. В. Саранцев[1)], С. Г. Шерман[1)], В. А. Никонов[1)], А. В. Саранцев[1)*]

Поступила в редакцию 11.08.2020 г.; после доработки 15.09.2020 г.; принята к публикации 15.09.2020 г.

Представлены дифференциальные спектры конечных частиц реакции $pn \to pp\pi^-$, полученные при девяти энергиях на пузырьковой камере, наполненной дейтерием. Спектры сравниваются с результатами парциально-волнового анализа данных, полученных с непрерывным пучком нейтронов на протонной мишени. На основе этого анализа нами был проведен совместный парциально-волновой анализ данных по протон-нейтронным, нейтрон-протонным и протон-протонным столкновениям. Это позволило определить вклады как изовекторных, так и изоскалярных парциальных волн с точностью, значительно превышающей полученные ранее значения.

DOI: 10.31857/S0044002721020136

1. ВВЕДЕНИЕ

Столкновения протонов и нейтронов являются базовыми реакциями сильных взаимодействий, и детальное знание всех свойств этих реакций — одна из важнейших задач физики частиц. Упругое столкновение изучено с высокой точностью и в широком интервале энергий. Однако свойства неупругих процессов известны относительно слабо. Одиночное рождение пионов в NN-столкновениях является основным неупругим процессом при энергиях ниже 1 ГэВ. При этом, если вклад изовекторных амплитуд, которыми определяется реакция рождения пиона в протон-протонных соударениях, известен довольно хорошо, вклад изоскалярных ($T = 0$) парциальных волн в рождение пиона при столкновении протона и нейтрона известен сравнительно плохо. Нейтрон-протонная амплитуда рассеяния содержит как изовекторную ($T = 1$), так и изоскалярную ($T = 0$) части. По существующим оценкам вклад изоскалярного сечения на порядок величины меньше вклада, определяемого изовекторными амплитудами. Таким образом выделение изоскалярных амплитуд, которые интерферируют с изовекторными амплитудами, является довольно деликатной задачей, при которой детальное знание больших изовекторных амплитуд играет важнейшую роль. Это определяет необходимость проведения одновременного анализа данных как по рождению пионов в протон-нейтронных столкновениях, так и по рождению пионов в протон-протонных столкновениях.

В настоящем исследовании мы выполнили парциально-волновой анализ данных по $pn \to pp\pi^-$-реакции, полученных в pd-взаимодействиях при девяти энергиях налетающего протона в области ниже 1 ГэВ. На первом этапе мы сравнили эти данные с результатами парциально-волнового анализа, выполненного нами ранее для данных, полученных для непрерывного пучка нейтронов [1] и данных по рождению π^0- и π^+-мезонов в pp-столкновениях, как полученные нами [2, 3], так и полученные при импульсе 950 МэВ/c [4]. На втором этапе мы включили данные по протон-дейтронному столкновению в нашу базу данных и провели полный совместный анализ всех указанных выше реакций.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ И ОТБОР ДАННЫХ

Эксперимент был выполнен на синхроциклотроне ПИЯФ с использованием 35-см пузырьковой камеры, находящейся в магнитном поле 14.8 кГс. Уменьшение энергии первичного выведенного 1 ГэВ протонного пучка достигалось с помощью медного поглотителя соответствующей толщины. Пучок протонов после поглотителя формировался тремя поворотными магнитами и восемью квадрупольными линзами. Величина импульса устанавливалась по токам в поворотных магнитах в соответствии с калибровкой нитью с током. Кроме того, начальный импульс проверялся по измерениям кривизны треков и последующей кинематике событий упругого pd-рассеяния. Точность определения импульса падающих на камеру протонов была

[1)]Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт” — ПИЯФ, Гатчина, Россия.
[*]E-mail: andsar@hiskp.uni-bonn.de

Таблица 1. Значения импульсов налетающих протонов (МэВ/c) и число событий реакции $pn \to pp\pi^-$ при каждом импульсе

Импульс пучка	1140	1217	1292	1348	1380	1438	1508	1562	1671
Число событий	266	305	703	944	773	908	700	1139	1128

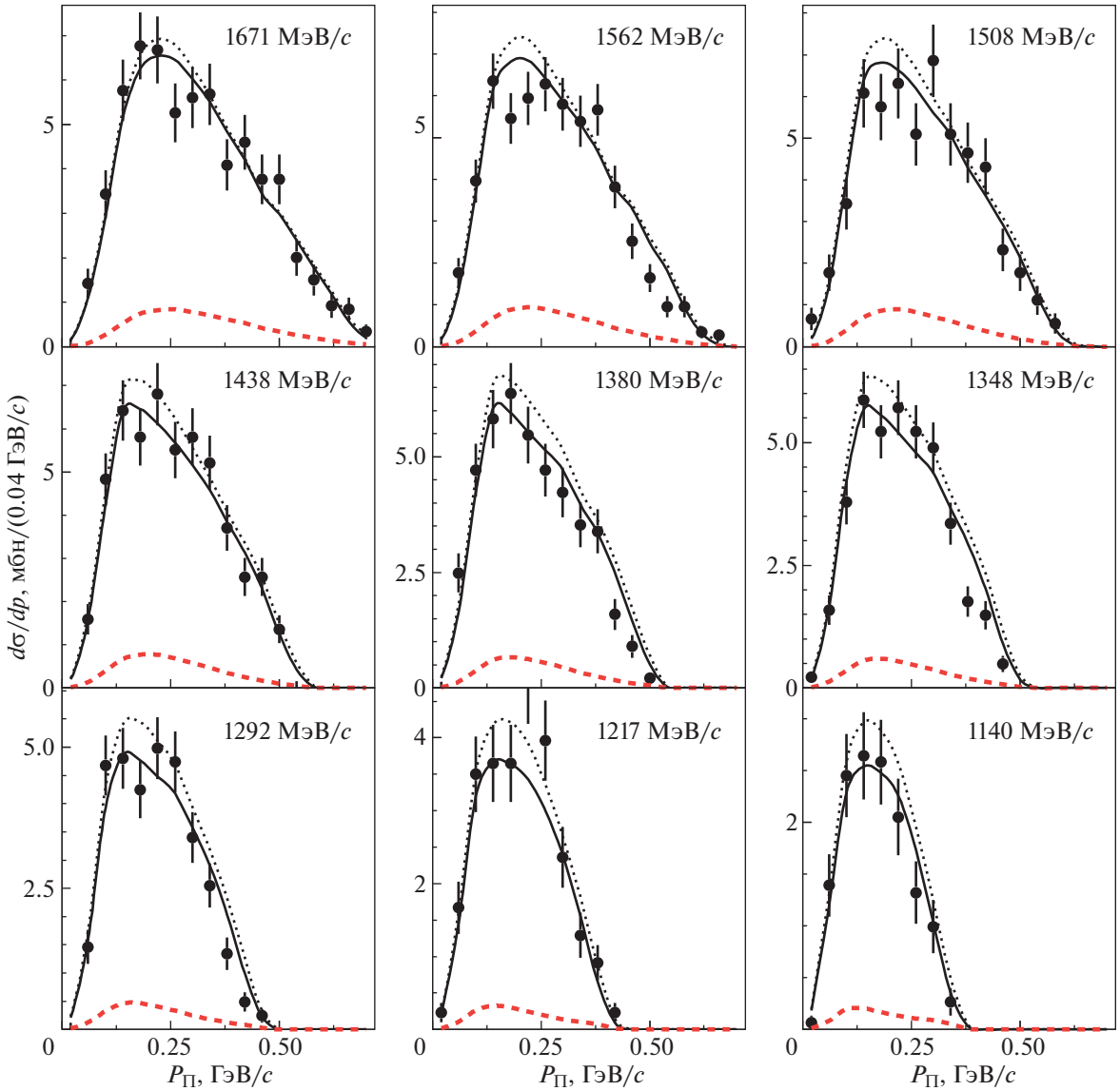

Рис. 1. Распределение по импульсу π^--мезона для событий реакции $pn \to pp\pi^-$ в лабораторной системе координат. Темные кружки — эксперимент, сплошные кривые — результаты парциально-волнового анализа, точечные — результаты парциально-волнового анализа из работы [1], штриховые — вклады изоскалярного сечения ($T = 0$). Распределения показаны для девяти значений импульса первичных протонов.

± 2 МэВ/c. Среднеквадратичный разброс импульса пучка составлял 4–5%. Примесь в падающем пучке более тяжелых частиц (d, t, He) определялась по времени пролета и оказалась пренебрежимо малой.

Всего было получено около 400000 стереофотографий, плотность облучения составляла в среднем 12–15 треков на кадр. В результате просмотра отбирались события с отрицательным и двумя или тремя положительными треками. Эффективность двойного просмотра составляла 99%. Отобранные

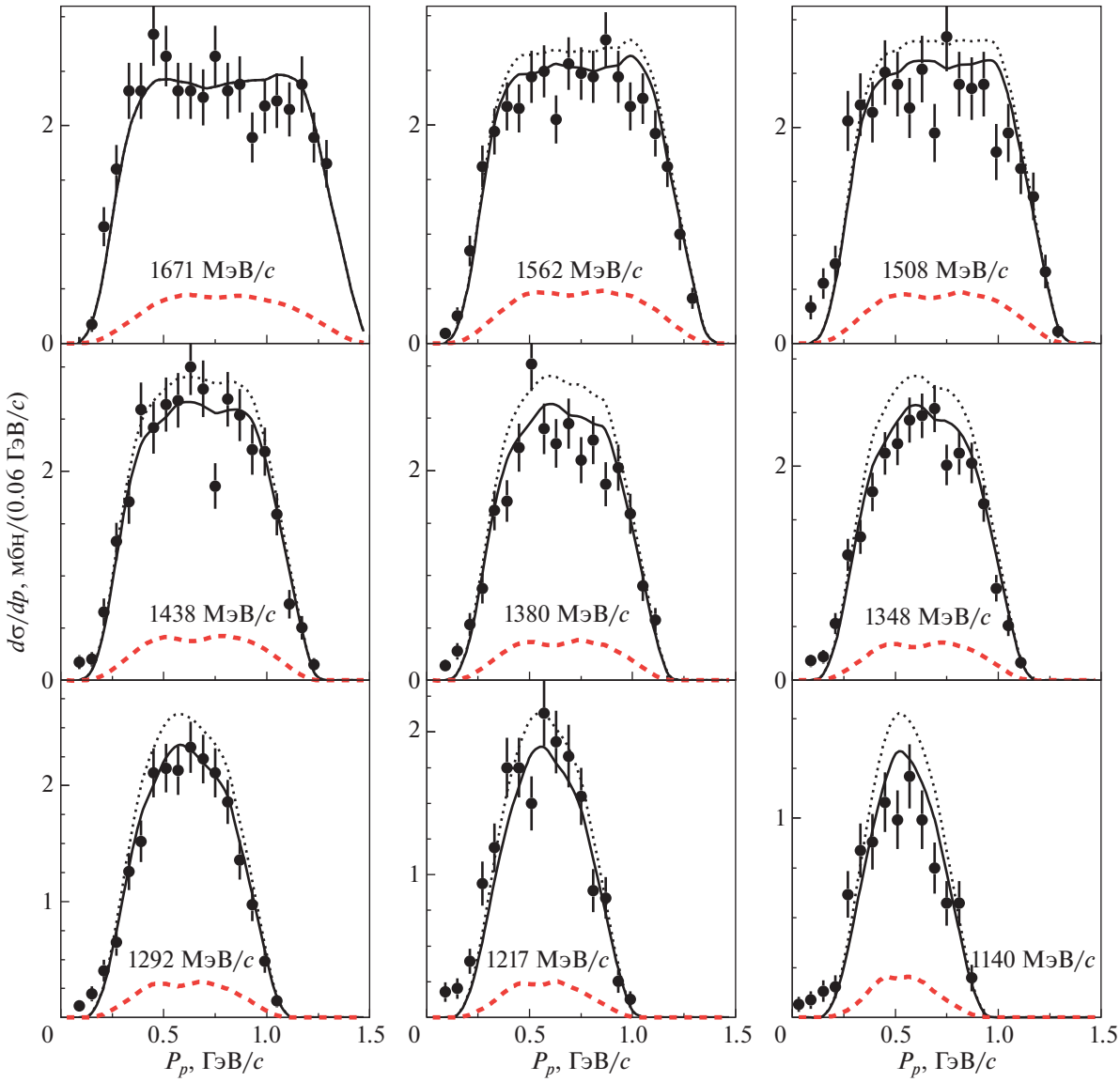

Рис. 2. Распределение по импульсу протона для событий реакции $pn \to pp\pi^-$ в лабораторной системе координат. Темные кружки — эксперимент, обозначения кривых те же, что на рис. 1.

события могли принадлежать следующим реакциям:

$$pd \to ppp\pi^-, \quad (1)$$

$$pd \to ppp\pi^-\pi^0, \quad (2)$$

$$pd \to ppn\pi^-\pi^+, \quad (3)$$

$$pd \to pd\pi^+\pi^-. \quad (4)$$

Трехлучевые события в интересующей нас реакции соответствуют случаю, когда протон является спектатором, имеет импульс менее 80 МэВ/c и потому не виден в пузырьковой камере. События с рождением далитц-пар отделялись по кинематическим и ионизационным критериям. Все события, находящиеся в полезном объеме камеры и пригодные для измерений, измерялись на полуавтоматах ПУОС. Идентификация каналов реакций основывалась на использовании величин χ^2 для каждого конкретного события на 1%-ном доверительном уровне. Если значения χ^2 для двух гипотез попадали в свой доверительный интервал, то для идентификации положительной частицы привлекалась визуальная оценка ионизации, которая позволяла принять окончательное решение относительно физической гипотезы события. Стандартная для пузырьковых камер процедура использовалась для получения абсолютных значений сечений рождения отрицательного пиона. Точность определения миллибарн-эквивалента была 2%. Кроме того, вводились поправки на учет ферми-импульса нейтрона в дейтроне и принципа Паули для тождественных

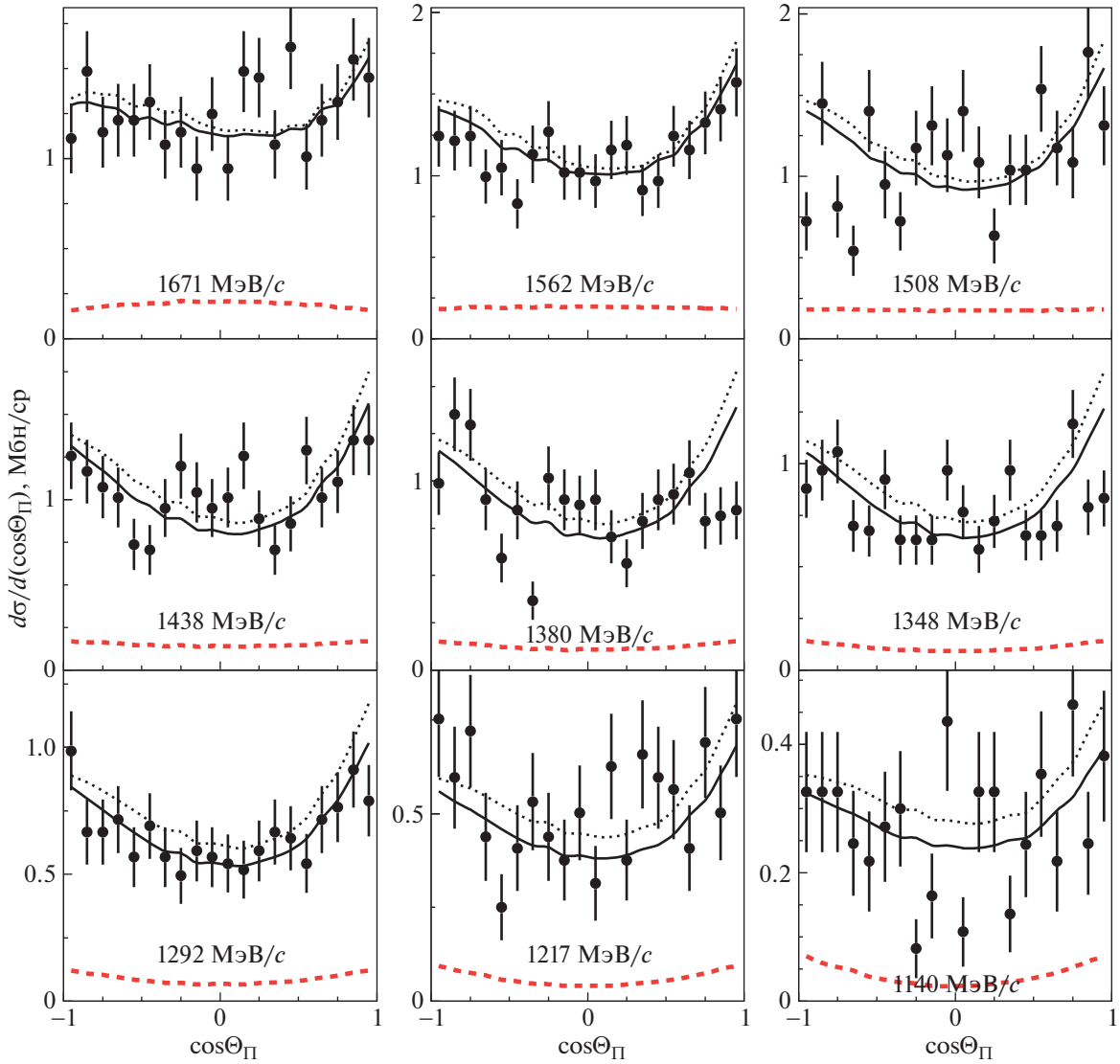

Рис. 3. Угловое распределение π^--мезонов в системе центра масс реакции. Темные кружки — эксперимент, обозначения кривых те же, что на рис. 1.

протонов [5]. В табл. 1 приведены значения импульсов налетающих на камеру протонов и число событий реакции $pn \to pp\pi^-$ при каждом импульсе.

3. АНАЛИЗ ДАННЫХ

На рис. 1, 2 представлены экспериментальные распределения по импульсам конечных частиц реакции $pn \to pp\pi^-$ в лабораторной системе координат при девяти импульсах налетающих протонов. В качестве событий указанной реакции брались события реакции (1) с импульсом протона-спектатора, меньшим 150 МэВ/c. Решение для парциальных волн, полученное при анализе данных [1], довольно неплохо предсказывает эти распределения (см. точечные линии на рис. 1, 2). Однако в обоих случаях предсказания заметно превышают данные в максимуме распределений. По-видимому, это связано с превышением определения полного сечения реакции нейтрон-протонного столкновения, которое довольно трудно контролировать в реакции с непрерывным пучком нейтронов. На рис. 3 представлены угловые распределения π^--мезонов конечного состояния в с.ц.м. реакции вместе с результатами вышеупомянутого парциально-волнового анализа. Именно асимметрия этих распределений ответственна за интерференцию изоскалярных и изовекторных амплитуд. Хотя форма распределений, включая асимметрию, предсказывается с хорошей точностью, однако и здесь наблюдается систематическое превышение предсказаний над экспериментальными данными. Мы не приводим здесь угловое распределение про-

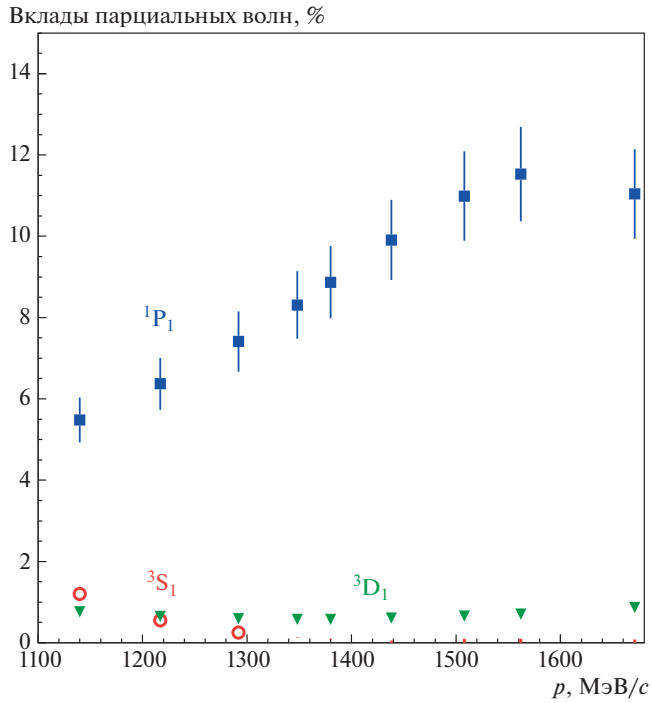

Рис. 4. Вклады (в процентах) наиболее важных изоскалярных волн в $pn \to pp\pi^-$.

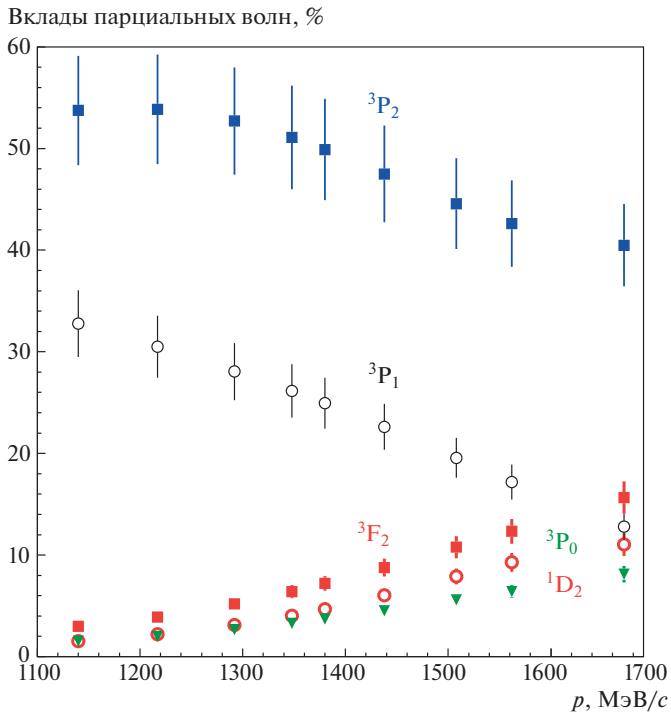

Рис. 5. Вклады (в процентах) наиболее важных изовекторных волн.

тонов, так как эти распределения симметричны [1] и не представляют особого интереса.

Уменьшение сечения реакции протон-нейтронного соударения связано главным образом с изменениями изоскалярных амплитуд. При изменении полного вклада и при сохранении асимметрии распределения пионов можно ожидать переоценки вкладов различных парциальных волн. Для выделения изоскалярных амплитуд мы провели совместный парциально-волновой анализ новых данных с данными, приведенными в статье [1]. Формализм приводится в деталях в [6–8] и основан на спин-орбитальном разложении начальных и конечных парциально-волновых амплитуд. В связи с этим было естественно использовать спектроскопические обозначения $^{2S+1}L_J$ для двухчастичных парциальных волн с внутренним спином S, орбитальным моментом L и полным спином J. Для описания энергетической зависимости в πN-системе вводились резонансы $\Delta(1232)3/2^+$ и Ропер $N(1440)1/2^+$, и для описания NN-взаимодействия использовалось модифицированное приближение эффективной длины рассеяния. Конкретные формулы можно найти в [1]. Кроме того, мы включили в анализ новые данные по pp неупругим реакциям с рождением π^0- и π^+-мезонов, опубликованные в [9–11] и измеренные при импульсах налетающего протона 1581, 1628 и 1683 МэВ/c. Это позволило лучше определить вклады изовекторных состояний на высокоэнергичной границе исследуемого интервала — нестабильные вклады амплитуд с высокими спинами фиксируются этими данными. Результаты такого совместного фита показаны на рисунках сплошными кривыми. Хорошо видно улучшение соответствия экспериментальных данных и парциально-волнового анализа. Это систематическое улучшение отражено в изменении χ^2, которое уменьшилось с 3.64 до 2.52 на степень свободы для 473 фитируемых точек. При этом описание дифференциальных сечений, полученных в измерениях с непрерывным пучком нейтронов, практически не изменилось: функция правдоподобия ухудшилась только на 30 для 8155 точек. В то же время полное сечение уменьшилось на величину 5–6%, что и позволило описать новые данные. Вклад изоскалярных амплитуд показан штриховыми кривыми и является существенно меньшим вклада изовекторных. На рис. 4 и 5 представлены вклады различных изовекторных и изоскалярных амплитуд в реакцию $pn \to pp\pi^-$ в зависимости от энергии налетающего пучка.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы провели сравнение новых экспериментальных данных по рождению отрицательных пионов в

pn-столкновениях с парциально-волновым анализом, выполненным ранее с использованием данных, полученных с непрерывным пучком нейтронов. Добавление новых экспериментальных данных в общий фит позволило уточнить вклады различных парциальных волн, в особенности вклад изоскалярных амплитуд. Данные и результаты анализа удовлетворительно согласуются, подтверждая малый вклад (менее 12%) изоскалярных парциальных волн в области энергий ниже 1 ГэВ.

В заключение мы хотели бы выразить признательность команде пузырьковой камеры, благодарность А.Б. Сокорнову и лаборантам, которые выполнили просмотр снимков и измерение событий. Работа В.А. Никонова и А.В. Саранцева выполнена в рамках гранта РНФ 16-12-10267-П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. V. Sarantsev, K. N. Ermakov, L. M. Kochenda, V. I. Medvedev, V. A. Nikonov, O. V. Rogachevsky, A. V. Sarantsev, S. G. Sherman, V. A. Trofimov, and A. A. Vasiliev, Eur. Phys. A **43**, 11 (2010).
2. V. P. Andreev, A. V. Kravtsov, M. M. Makarov, V. I. Medvedev, V. I. Poromov, V. V. Sarantsev, S. G. Sherman, G. L. Sokolov, and A. B. Sokornov, Phys. Rev. C **50**, 15 (1994).
3. V. V. Sarantsev *et al.*, Eur. Phys. J. A **21**, 33 (2004).
4. The COSY-TOF Collab. (S. A. El-Samad *et al.*), Eur. Phys. J. A **30**, 443 (2006).
5. Л. Г. Дахно, А. В. Кравцов, Е. А. Лобачёв, М. М. Макаров, В. И. Медведев, Г. З. Обрант, В. И. Поромов, В. В. Саранцев, В. М. Сирин, Г. Л. Соколов, С. Г. Шерман, ЯФ **36**, 143 (1982) [Sov. J. Nucl. Phys. **36**, 83 (1982)].
6. A. V. Anisovich, E. Klempt, A. V. Sarantsev, and U. Thoma, Eur. Phys. J. A **24**, 111 (2005).
7. A. V. Anisovich and A. V. Sarantsev, Eur. Phys. J. **30**, 427 (2006).
8. A. V. Anisovich, V. V. Anisovich, E. Klempt, V. A. Nikonov, and A. V. Sarantsev, Eur. Phys. J. A **34**, 129 (2007).
9. K. N. Ermakov, V. I. Medvedev, V. A. Nikonov, O. V. Rogachevsky, A. V. Sarantsev, V. V. Sarantsev and S. G. Sherman, Eur. Phys. J. A **50**, 98 (2014).
10. K. N. Ermakov, V. I. Medvedev, V. A. Nikonov, O. V. Rogachevsky, A. V. Sarantsev, V. V. Sarantsev, and S. G. Sherman, Eur. Phys. J. A **47**, 159 (2011).
11. K. N. Ermakov, V. A. Nikonov, O. V. Rogachevsky, A. V. Sarantsev, V. V. Sarantsev, and S. G. Sherman, Eur. Phys. J. A **53**, 122 (2017).

STUDY OF THE NEGATIVE PION PRODUCTION IN THE pn COLLISION REACTION MEASURED IN THE BEAM MOMENTA INTERVAL 1140–1670 MeV/c

V. V. Sarantsev, S. G. Sherman, V. A. Nikonov, and A. V. Sarantsev

National Research Center "Kurchatov Institute" — PNPI, Gatchina 188300, Russia

The spectra of the final particles from the $pn \to pp\pi^-$ reaction measured at the nine energies in the deuterium bubble chamber are presented. The obtained spectra are compared with the predictions from the partial-wave analysis performed earlier for the $np \to pp\pi^-$ data measured in the same energy region but for the continue neutron beam. On the base of this analysis we have made the combined analysis which includes the new date on the proton-neutron collision and the old data on the neutron-proton and the proton-proton collisions. It allows us to determine the contributions from the isovector and the isoscalar amplitudes with the notably better precision than earlier.