

C-891

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1 - 9704

СУВОРОВ  
Всеволод Михайлович

ИССЛЕДОВАНИЕ  $\pi^-$ -МЕЗОАТОМНЫХ  
И  $\pi^-$ -МЕЗОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ  $H_2 + Z$   
И ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЯХ

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени кандидата физико-математических наук

Дубна 1976

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем  
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель: старший научный сотрудник кандидат  
физико-математических наук В.И.Петрухин.

Официальные оппоненты:  
доктор физико-математических наук  
Л.И.Пономарев,  
кандидат физико-математических наук  
М.Я.Балац.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:  
Ленинградский институт ядерной физики АН СССР, г.Гатчина,  
Ленинградской области.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " 1976 г.

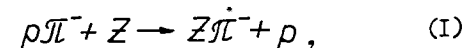
Защита диссертации состоится " \_\_\_\_\_ " 1976 г.  
в " \_\_\_\_\_ " часов на заседании специализированного совета Д-56/3  
Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного  
института ядерных исследований.

Ученый секретарь совета  
кандидат физико-математических наук

Ю.А.Батусов

В диссертации излагаются результаты опытов, в которых обнаружен перехват  $\pi^-$ -мезонов в газовых смесях водорода с He,  $N_2$ , Ne и Ar <sup>1/1</sup>:



исследованы основные характеристики этого процесса и атомный захват в смесях  $H_2 + Z$  ( $Z$  суть He, Ne, Ar, Kr, Xe и  $N_2$ ,  $CO_2$ ) <sup>2,3/</sup>, а также экспериментально показана возможность классификации водородосодержащих кислот по силе согласно вероятностям ядерного захвата  $\pi^-$ -мезонов связанным водородом.

Установлен закон атомного захвата  $\pi^-$ -мезонов в газовых смесях  $H_2 + Z$ , где  $Z$  - благородные газы и азот. Отношение вероятностей атомного захвата газом  $Z$  и водородом подчиняется зависимости  $S_0^H = (7,1 \pm 0,1)(Z^{1/3} - 1)$ . Вероятность захвата пионов молекулой  $CO_2$  больше величины, которую можно получить интерполяцией наших данных для одноатомных газов, полагая, что захват аддитивен.

Перехват (I) происходит из возбужденных состояний  $\rho\pi^-$ -мезоатома ( $n \geq 3$ ); интенсивность перехвата целиком определяется конкуренцией его с процессами девозбуждения  $\rho\pi^-$ -мезоатома и ядерным захватом пиона протоном, идущими в столкновениях  $\rho\pi^- + H_2$ . Относительная скорость перехвата  $\Lambda$  для всех газов, исключая  $CO_2$ , подчиняется той же зависимости от  $Z$ , что и вероятность атомного захвата, и слабо зависит от концентрации  $C$  атомов примеси:  $\Lambda = S_0^H C^{1/3}$  ( $C = n_Z/n_H$ ,  $n_Z$  и  $n_H$  - числа ядер  $Z$  и протонов в  $cm^3$ ). Скорость перехвата пионов на молекулу  $CO_2$  меньше суммы скоростей перехвата на составляющие её атомы, что обусловлено взаимным экранированием атомов в молекуле, тогда как вероятность атомного захвата больше величины, получаемой интерполяцией наших данных.

В ряду OH-кислот и гидроокисей обнаружена чёткая корреляция между подавлением вероятности  $W$  ядерного захвата  $\pi^-$ -мезонов связанным водородом и силой кислоты <sup>3,4/</sup>. Эта корреляция означает, что представления модели больших мезомолекул (Л.И.Пономарёв. ЯФ. 2, 223 (1965); 6, 389 (1967)) об увеличении ионности связи H-O при переходе к сильным кислотам как основной причине увеличения подавления и силы кислот согласуются с предположениями теории электронных смещений в химии (Л.Гаммет. Основы физической органической химии. Мир, Москва, 1972).

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Во введении даётся краткое описание экспериментальной и теоретической ситуации, сложившейся к началу наших опытов, и на этой основе формулируется цель проводившихся экспериментов.

До наших опытов был подробно изучен перехват  $\mu^-$ -мезонов на атомы благородных газов, исключая гелий. Так как время жизни  $\mu^-$ -мезона значительно превышает длительность всех каскадных переходов, то при малых концентрациях примеси  $Z$   $\mu^-$ -мезон успевает достичь К-орбиты и, длительно пребывая на ней, эффективно перехватывается даже при очень малых концентрациях атомов  $Z$  ( $C \leq 10^{-3}$ ). Приведённая константа перехвата  $\mu^-$ -мезонов (скорость перехвата в смеси при  $C = 1$  и плотности водорода  $n_H = n_H^0$ , где  $n_H^0 = 4,2 \cdot 10^{22}$  протонов/см<sup>3</sup> - плотность жидкого водорода) пропорциональна  $Z$  (С.С. Герштейн и др. УФН 97, 3 (1969)),

$$\lambda_Z^\mu = 8,4 \cdot 10^9 Z \text{ с}^{-1}. \quad (2)$$

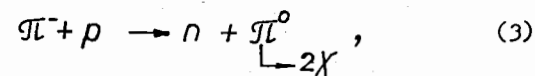
В отличие от мюонов перехват  $\pi^-$ -мезонов не наблюдался. Неудача первых попыток наблюдения перехвата пионов (О.А. Займидорога и др. ЖЭТФ 44, 1852 (1963); D. Bartlett et al. Phys. Rev., 136B, 1452 (1964); K. Derrick et al. Phys. Rev., 151, 82 (1966)) был обусловлен резкими различиями в перехвате  $\mu^-$ - и  $\pi^-$ -мезонов, выяснившимися после его обнаружения <sup>1/1</sup>.

К началу наших опытов ядерный захват  $\pi^-$ -мезонов связанным водородом был обнаружен, были изучены его характерные особенности, что послужило толчком к созданию модели больших мезомолекул. По модели при переходе мезона из непрерывного спектра в дискретный возможен захват мезона на мезомолекулярную орбиталь, имеющую атомные размеры. Мезоны захватываются в связанные состояния по механизму замещения электрона, который переходит в состояния непрерывного спектра. Орбита мезона оказывается при этом в окрестности орбиты замещённого электрона - "принцип геометрического подобия электронной и мезонной орбит". При этом вероятность перехода с мезомолекулярной орбитали на изолированные уровни мезоатомов чувствительна к особенностям химической связи атомов. В водородосодержащих соединениях протоном захватываются только те пионы, которые первоначально попадают на общие мезомолекулярные уровни  $Z$ -H связи и затем при девозбуждении мезомолекул переходят на изолированные уровни мезоатомов. Поскольку единственный электрон атома водорода отдан на

образование химической связи, при переходе пиона из непрерывного спектра в дискретный  $\pi^-$ -мезоатом образоваться не может. Пионы, которые замещают электроны атомов  $Z$  молекулы, в образовании  $\pi^-$ -мезоатомов и, следовательно, в захвате пионов связанными протонами не участвуют. Модель больших мезомолекул предсказывает, таким образом, чувствительность вероятности  $W$  ядерного захвата  $\pi^-$ -мезонов связанным водородом к электронной структуре химической связи водорода (З.В. Круштейн и др. ЖЭТФ 54, 1690 (1968)).

Цель наших опытов состояла в попытке обнаружить и исследовать перехват  $\pi^-$ -мезонов в смесях водорода с другими газами, а также попытаться найти связь между вероятностью захвата  $W$  и свойствами связи  $Z$ -H.

В главе I диссертации описывается постановка эксперимента. Для идентификации ядерного захвата остановившихся  $\pi^-$ -мезонов водородом водородосодержащих соединений использовалась реакция перезарядки



протекающая с вероятностью  $\sim 60\%$ . Образующиеся по реакции (3)  $\pi^0$ -мезоны за время  $\sim 10^{-16}$  с распадаются на два  $\gamma$ -кванта, испускающихся с углом разлёта, изменяющимся от  $157^\circ$  до  $180^\circ$ . Энергия каждого  $\gamma$ -кванта заключена в интервале  $56 \leq E_\gamma \leq 84$  МэВ. Экспериментально было показано, что перезарядка остановившихся  $\pi^-$ -мезонов при захвате сложными ядрами (исключая ядро  $\text{He}^3$ ) подавлена до уровня  $10^{-4}$  -  $10^{-5}$  (В.И. Петрухин и др. ЯФ 5, 327 (1967); V.I. Petrukhin, Yu.D. Prokoshkin. Nucl. Phys., 54, 414 (1964)). Образование  $\pi^0$ -мезонов с вероятностью  $W > 10^{-4}$  на один остановившийся в исследуемом водородосодержащем веществе  $\pi^-$ -мезон можно, таким образом, приписать процессу (3).

Схема опыта приведена на рис. I.  $\pi^-$ -мезоны с энергией  $\sim 80$  МэВ от синхроциклотрона ОИЯИ проходили три сцинтилляционных счётчика  $C_1$ - $C_3$ , тормозящий фильтр  $\Phi$  и останавливались в мишени М. Регистрация  $\pi^-$ -мезонов, образующихся в мишени, осуществлялась двумя черенковскими спектрометрами полного поглощения  $Ч_1$  и  $Ч_2$ . Радиаторы спектрометров представляли собой параллелепипеды размерами  $200 \times 200 \times 300$  мм<sup>3</sup>, изготовленные из высококачественного стекла марки ЛФ-5. Угловые размеры радиаторов относительно центра мишени составляли  $58^\circ$  в горизонтальной плоскости и  $65^\circ$  в вертикальной. Максимальная геометрическая эффективность установки равнялась  $\sim 20\%$ . Для моделирования  $\pi^-$ -совпадений и периодического контроля установки счёт-

чки и спектрометры были снабжены электролюминесцентными диодами, которые давали одновременные световые сигналы при запуске их от генератора сигналов наносекундной длительности.

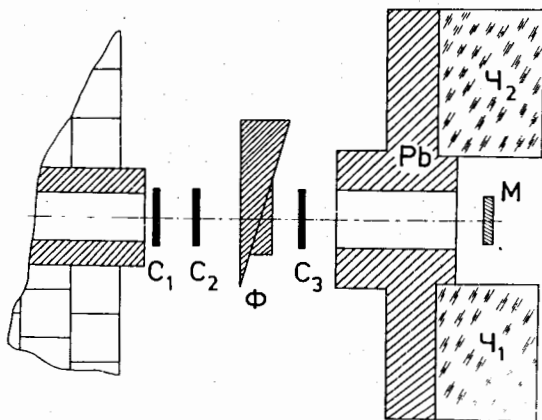


Рис. I. Схема опыта.

Сигналы от фотоумножителей спектрометров и счётчика  $C_3$  поступали на интегральные дискриминаторы (в ряде опытов - формирователи с ослабителями на входе) и далее на две схемы совпадений, регистрирующие события, соответствующие прохождению частицей счётчика  $C_3$  в совпадении с жёстким  $\gamma$ -квантом, зарегистрированным одним из спектрометров ( $C_3\chi_1$  и  $C_3\chi_2$ ). Регистрация одиночных  $\gamma$ -квантов ( $C_3\chi_1$ ,  $C_3\chi_2$ ), образовавшихся в мишени по реакции радиационного захвата  $\pi^- + A_Z \rightarrow \gamma + \dots$ , оказалась весьма полезной для контроля стабильности аппаратуры и определения максимума кривой остановок  $\pi^-$ -мезонов в мишенях, где вероятность  $W$  мала. Реакция (3) выделялась по совпадениям сигналов  $C_3\chi_1$  и  $C_3\chi_2$ , соответствующим прохождению частицей счётчика  $C_3$  с одновременным срабатыванием обоих спектрометров.

Основным фоновым процессом при детектировании реакции (3), ограничивающим минимальную измеряемую величину вероятности  $W$ , являлась перезарядка  $\pi^-$ -мезонов на лету на ядрах мишени, которая из-за плохого энергетического и углового разрешения установки практически неотличима при малых энергиях  $\pi^-$ -мезонов от изучаемого нами процесса. Оказалось, что всегда можно подобрать такой режим работы аппаратуры, при котором скорости счёта  $\pi^-$ -мезонов от перезарядки на лету на ядрах мишени являлись линейными функциями толщины

$R$  фильтра, что существенно упрощает обработку результатов измерений. Задача подавления фона от перезарядки на лету состояла в том, чтобы без существенной потери частиц в максимуме кривой пробегов  $\pi^-$ -мезонов сформировать пучок с минимальным разбросом  $\Gamma_0$  пробегов пионов и максимальным подавлением высокоэнергетичной компоненты пучка пионов.

Остальные источники фона сводились в основном к случайной загрузке спектрометров фоновым излучением и загрузке жёсткими одиночными  $\gamma$ -квантами от радиационного захвата прошедших счётчик  $C_3$  пионов ядрами мишени, стенок коллиматора и т.д. В целом скорость счёта случайных совпадений была на порядок величины меньше эффекта от реакции (3) при величинах измеряемых вероятностей  $W < 10^{-4}$  и не зависела от  $R$ , являясь незначительной добавкой к основному фоновому процессу - перезарядке на лету на ядрах мишени.

Формирование пучка мезонов, настройка и калибровка аппаратуры производились с помощью жидководородной мишени. Образующиеся на внутренней мишени синхроциклотрона мезоны с импульсом  $p \sim 175$  МэВ/с выводились магнитным полем синхроциклотрона в направлении анализирующего магнита СП-37, отклонявшего пучок в коллиматор в защитной стене ускорителя, и попадали на жидководородную мишень. Разброс по импульсу частиц в несформированном пучке  $\Delta p/p \sim \pm(6 + 7)\%$ , интенсивность  $(2,4 + 2,6) \cdot 10^5$  частиц/с. Изменение характеристик пучка при формировании контролировалось по виду кривых выхода  $\pi^0$ -мезонов от жидководородной мишени  $N_{48}(R)$ , измеряемых в зависимости от толщины  $R$  фильтра. Интенсивность выводимого на мишень пучка уменьшалась после формирования пучка на  $\sim 30\%$  при незначительном изменении скорости счёта  $\pi^0$ -мезонов от жидководородной мишени ( $\approx 6\%$ ). При среднем пробеге пионов в пучке  $R_0 \sim 22$  г·см<sup>-2</sup> С (углерода) скорость счёта  $\pi^0$ -мезонов, обусловленная остановками в водороде  $\pi^-$ -мезонов с пробегом  $R \sim 26$  г·см<sup>-2</sup> С, падала в  $\sim 20$  раз. Ширина кривой выхода  $N_{48}(R)$  уменьшалась примерно на 20% и в среднем составляла  $\sim 2,85$  г·см<sup>-2</sup> С для жидководородной мишени. Это означает, что изменение интенсивности связано с исключением из пучка в основном жёсткой компоненты. Разброс  $\pi^-$ -мезонов по пробегу в сформированном пучке  $\Gamma_0 \sim 2,4$  г·см<sup>-2</sup> С; распределение остановок по площади мишени в максимуме кривой, измеренное звёздным детектором, описывалось кривой Гаусса с шириной на полувысоте  $\sim 12,7$  см.

Глава II диссертации посвящена описанию эксперимента по поиску перехвата  $\pi^-$ -мезонов в газовых смесях  $H_2 + Z$ , где  $Z$  суть He,  $N_2$ , Ne и Ar <sup>1/1</sup>. В опытах использовались мишени высокого



давления, представляющие собой стальные сферы объёмом 900 см<sup>3</sup>. Смеси приготавливались добавлением к водороду газа Z под избыточным давлением P ~ 20 атм, так что плотность водорода в мишенях в отдельных сериях измерений оставалась постоянной, изменялась плотность газа Z. Диапазон изменения плотности водорода по различным сериям измерений составлял  $n_H \approx (1,6+13,4) \cdot 10^{-2} n_H^0$ , в среднем  $n_H \approx 5,2 \cdot 10^{-2} n_H^0$ .

Для каждой смеси, включая чистый водород (C=0), на пучке пионов находилась зависимость  $N_{\pi^0}(R, C)$  скорости счета пар  $\gamma$ -квантов от толщины R фильтра. Результаты одной из серий таких измерений приведены на рис. 2.

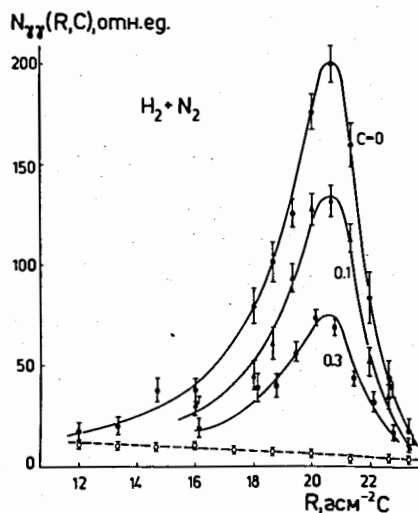


Рис. 2. Кривые выхода  $\pi^0$ -мезонов от газовой смеси  $H_2 + N_2$  при различных концентрациях азота и плотности водорода в мишени  $n_H = 9,7 \cdot 10^{-2} n_H^0$ . Концентрации азота указаны цифрами у кривых. Пунктирная кривая проведена по точкам, полученным с вакуумированной мишенью.

Кривые выхода  $\pi^0$ -мезонов от перезарядки (3)  $N_{\pi^0}(R, C)$  определялись путём вычитания из ординат кривых  $N_{\pi^0}(R, C)$  фона от перезарядки  $\pi^0$ -мезонов на лету в веществе стенок мишеней (основной вклад в фон) и в газовой смеси (доля ~ 7-15% выхода от вакуумированной мишени). Для каждой концентрации C по кривым  $N_{\pi^0}(R, C)$  и  $N_{\pi^0}(R, 0)$  определялось уменьшение  $\alpha(C)$  выхода  $\pi^0$ -мезонов из-за перехвата, равное усреднённому по кривым отношению  $N_{\pi^0}(R, C) / N_{\pi^0}(R, 0)$ . При определении  $\alpha(C)$  учитывалось различное влияние формы кривой пробогов  $\pi^0$ -мезонов на числа остановок в водороде и смеси, связанное с различием в тормозных толщинах мишеней.

Вероятность  $W(C)$  ядерного захвата водородом остановившегося в смеси  $H_2 + Z$   $\pi^-$ -мезона связана с уменьшением  $\alpha(C)$  соотношением

$$W(C) = \frac{\alpha(C)\Delta}{\Delta_0(1-\delta)}, \quad (4)$$

где  $\Delta$  и  $\Delta_0$  - тормозные толщины газовой смеси и водорода;  $\delta$  - учитывает различие в эффективностях регистрации  $\pi^0$ -мезонов из-за разного поглощения  $\gamma$ -квантов в водороде и смеси  $H_2 + Z$ . Геометрия опыта в измерениях оставалась постоянной.

Вероятность  $W(C)$  определяется идущим с вероятностью  $P(C)$  атомным захватом пиона водородом в смеси и ядерным захватом  $\pi^-$ -мезона в  $p\pi^-$ -мезоатоме, вероятность которого -  $q(C)$ , т.е.  $W = pq$ .  $q(C) < 1$  при наличии перехвата. Вероятность атомного захвата  $P(C)$  равна

$$P(C) = (1 + S_0^H C)^{-1}, \quad (5)$$

где  $S_0^H$  - отношение вероятностей атомного захвата  $\pi^-$ -мезона газом Z и водородом. Экспериментально атомный захват мезонов в газовых смесях изучался в двух работах (В.И.Петрухин и др. ЯФ, 6, 1008 (1967); В.Г.Будяшов и др. ЯФ, 5, 830 (1967)), из анализа результатов которых следует, что атомный захват происходит с вероятностями, пропорциональными тормозным способностям атомов. В нашей постановке опыта (плотность водорода в смеси в каждой серии измерений постоянна) отношение  $\Delta / \Delta_0$  равно  $(1 + S^H C)$ ,  $S^H$  - отношение тормозных способностей атомов Z и водорода, усреднённое по пробегам мезонов, останавливающихся в смеси. При первом изучении перехвата мы полагали справедливым равенство  $S_0^H = S^H$ . Результаты обработки приведены на рис. 3. Как следует из рисунка, перехват  $\pi^-$ -мезонов на тяжёлые атомы существует и интенсивно протекает при концентрациях примеси  $C \gg 0,1$ . Перехват на атомы гелия одинаков по порядку величины с перехватом на другие атомы. Интенсивность перехвата в смесях  $H_2 + Z$  при фиксированных значениях C оказалась в пределах погрешностей измерений не зависящей от плотности водорода  $n_H$  и определялась только относительной концентрацией тяжёлых атомов. Зависимость интенсивности перехвата пионов только от C, а не от  $n_H$  и  $n_Z$  в отдельности означает, что перехват и конкурирующие с ним девозбуждение  $p\pi^-$ -мезоатома и последующий ядерный захват  $\pi^-$ -мезона протоном определяется только столкновениями  $p\pi^-$ -мезоатомов. Для анализа полученных результатов использовалась упрощённая феноменологическая схема процессов, по которой в результате столкновений образо-

вавшегося в смеси возбуждённого  $\rho\pi^-$ -мезоатома с водородом и атомами примеси  $Z$   $\pi^-$ -мезон девозбуждается и захватывается протоном

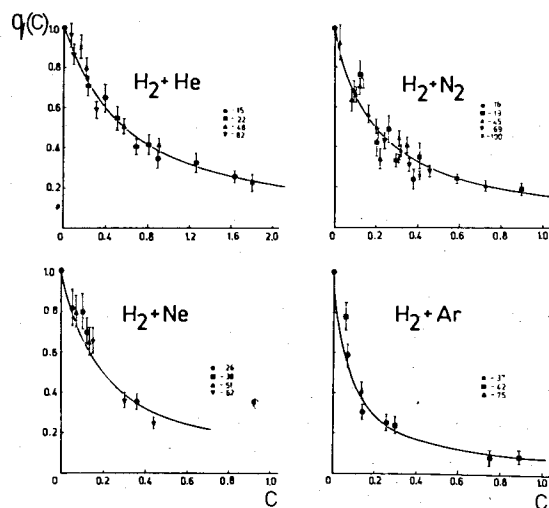


Рис.3. Вероятность  $q(C)$  захвата  $\pi^-$ -мезона в  $\rho\pi^-$ -мезоатоме при различных относительных концентрациях  $C$  для смесей водорода с He,  $N_2$ , Ne и Ar. Значения плотности водорода в единицах  $10^{23}n_H^0$  указаны цифрами.

$n_H^0 = 4,2 \cdot 10^{22}$  протонов/см<sup>3</sup> - плотность жидкого водорода. Кривые проведены по формуле (6).

со скоростью  $\lambda_p = a n_H + b n_Z$  или перехватывается на атоме  $Z$ , скорость перехвата  $\lambda_Z = c n_Z$ . Вклад в захват не зависящих от столкновений радиационных переходов обнаружен не был и в приведённой схеме не учитывается. В этой схеме вероятность  $q$  равна

$$q(C) = \frac{1 + \alpha C}{1 + (\Lambda + \alpha)C} \quad (6)$$

где  $\Lambda = d/a$  и  $\alpha = b/a$  - относительные скорости перехвата и захвата  $\pi^-$ -мезонов протонами в столкновениях  $\rho\pi^-$ -мезоатомов с атомами  $Z$  при  $C = 1$ . Полученные методом наименьших квадратов значения относительной скорости  $\Lambda$  подчиняются линейной зависимости

$$\Lambda = (0,7 \pm 0,2) Z \quad (7)$$

Из зависимости (7) следует, что при столкновениях  $\rho\pi^-$ -мезоатомов с атомами примеси  $Z$  перехват значительно более вероятен (особенно при больших  $Z$ ), чем захват  $\pi^-$ -мезона протоном в результате столкновений  $\rho\pi^-$ -мезоатомов с водородом. Значения коэффициента  $\alpha$  в пределах погрешностей совпали с нулём. Неравенство  $\Lambda \gg \alpha \sim 0$  свидетельствует об отсутствии заметного влияния столкновений  $\rho\pi^- + Z$  на скорость захвата пиона протоном.

По зависимости (7) оценена величина приведённой константы перехвата  $\pi^-$ -мезонов

$$\lambda_Z \geq 3 \cdot 10^{11} Z \text{ с}^{-1} \quad (8)$$

Если принять, что скорость перехвата пропорциональна квадрату радиуса мезоатома ( $r^2 \sim n^4$ ), то из сравнения (2) и (8) можно сделать оценку, по которой  $\pi^-$ -мезоны перехватываются из состояний с

$n \geq 3$ .  $\pi^-$ -мезоны перехватываются только из возбуждённых состояний  $\rho\pi^-$ -мезоатомов из-за наличия интенсивного ядерного захвата протонами, скорость которого из основного и низших  $nS$ -состояний весьма велика:  $\Gamma_C(nS) = 1,1 \cdot 10^{15} n^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Это является причиной коренного различия в перехвате  $\mu^-$  и  $\pi^-$ -мезонов. Основными конкурирующими с перехватом пионов процессами являются происходящие при столкновениях  $\rho\pi^- + H_2$  девозбуждение  $\rho\pi^-$ -мезоатомов за счёт внешнего оже-эффекта на электронах соседних атомов и ядерный захват  $\pi^-$ -мезонов из возбуждённых  $nS$ -состояний за счёт эффекта Дя-

Сноу-Сачера (H.A. Bethe, M. Leon, Phys. Rev., 127, 636 (1962)). Нейтроноподобный возбуждённый  $\rho\pi^-$ -мезоатом, попадая внутрь электронной оболочки атома водорода, благодаря шарковскому эффекту в электрическом поле протона, может после столкновения оказаться в  $nS$ -состоянии, в котором  $\pi^-$ -мезон интенсивно захватывается протоном. Из-за высоких скоростей девозбуждения и ядерного захвата  $\pi^-$ -мезонов, происходящих при столкновениях  $\rho\pi^-$ -мезоатомов, перехват  $\pi^-$ -мезонов может происходить лишь при больших концентрациях примеси. Радиационные переходы не могут образовать независимого от столкновений канала девозбуждения, поскольку их вклад в девозбуждение становится значимым только для состояний с  $n \leq 3$ , заселённости которых малы. Участие в перехвате возбуждённых состояний  $\rho\pi^-$ -мезоатома, для которых отсутствует наблюдающийся в случае  $\mu^-$ -мезонов запрет перехвата с K-оболочки, объясняет интенсивный перехват атомами гелия.

Результаты последующего, более детального изучения перехвата и атомного захвата  $\pi^-$ -мезонов в газовых смесях<sup>2,3/</sup> составляют содержание третьей главы диссертации. В новых опытах: 1) расширен диапазон изменения  $Z$  за счёт включения смесей  $H_2 + Kr$  и  $H_2 + Xe$ ; 2) расширен диапазон изменения концентраций как в сторону больших, так и малых значений  $C$ ; 3) измерения выполнены с меньшим шагом  $\Delta C$ ; 4) увеличен диапазон изменения плотности водорода  $\rho_H = (0,005 + 0,1)\rho_H^0$ ; 5) изучен перехват на молекулу  $CO_2$ .

Для выделения атомного захвата  $\pi^-$ -мезонов при обработке предполагалось, что величина  $S_0^H$  в  $P(C)$  (5) неизвестна и подлежит определению. Зависимость вероятности захвата  $W(C)$  удалось удовлетворительно описать с помощью формулы

$$W(C) = \left[ (1 + S_0^H C)(1 + \Lambda C) \right]^{-1}, \quad (9)$$

где  $\Lambda = \Lambda_0^{1/3}$  и  $A, S_0^H$  - постоянные для каждого газа параметры. Для  $CO_2$  в формуле (9)  $C = 3\rho_{CO_2}/\rho$ , где  $\rho_{CO_2}$  - число молекул  $CO_2$  в  $см^3$ . Полученные в этом случае параметры соответствуют атомному захвату и перехвату атомами с  $Z = 7,3$ . Для всех газов, кроме  $CO_2$ ,

$$S_0^H = A. \quad (10)$$

Полученные методом наименьших квадратов значения  $A$  и  $S_0^H$  приведены в таблице I. В таблице  $N$  - число электронов во внешней оболочке атома.

Таблица I

Газ	$S_0^H$	$N$	$\tilde{S}^H$	$S^H$	$A$
He	$1,84 \pm 0,09$	2	1,73	$1,72 \pm 0,13^{xx}$	$1,84 \pm 0,09$
Ne	$7,65 \pm 0,35$	8	7,25	$7,1 \pm 0,4^{xx}$	$7,65 \pm 0,35$
Ar	$11,6 \pm 0,4$	8	11,8		$11,6 \pm 0,4$
Kr	$16,4 \pm 0,6$	18	20,0		$16,4 \pm 0,6$
Xe	$20,4 \pm 0,7$	18	27,6		$20,4 \pm 0,7$
$N_2$	$6,6 \pm 0,3$	5	5,5	$5,8 \pm 0,3^{xx}$	$6,6 \pm 0,03$
$CO_2$	$8,8 \pm 1,0$	5,3	5,5	$6,4 \pm 0,4^x$ $8,5 \pm 0,7^{xx}$	$3,7 \pm 0,6$

На рис. 4 приведены экспериментальные данные для смесей  $H_2$  с He, Ne и Xe. Для всех газов, кроме  $CO_2$ , значения  $S_0^H$  описываются линейной зависимостью от  $Z^{1/3}$  (рис. 5):

$$S_0^H = (7,1 \pm 0,1)(Z^{1/3} - 1). \quad (11)$$

Условие (10) означает, что атомный захват и перехват описываются одной и той же зависимостью от атомного номера  $Z$ .

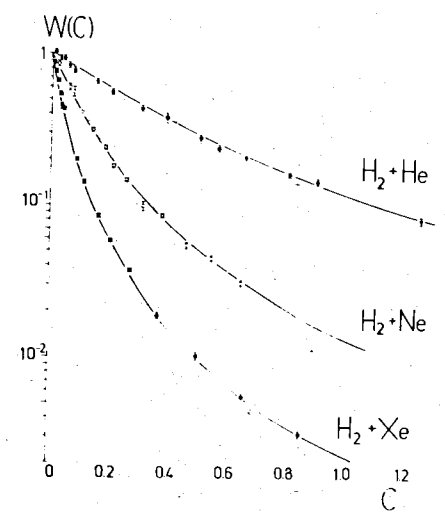


Рис. 4. Вероятности  $W(C)$  ядерного захвата пионов протонами в смесях водорода с He, Ne и Xe в зависимости от концентрации  $C$ . Кривые проведены по (9) при условии (10) и значениях  $S_0^H$  из таблицы I.

Полученные из опыта значения  $S_0^H$  близки по величине к числу электронов во внешней оболочке атома -  $N$  (исключая  $CO_2$ ), что может

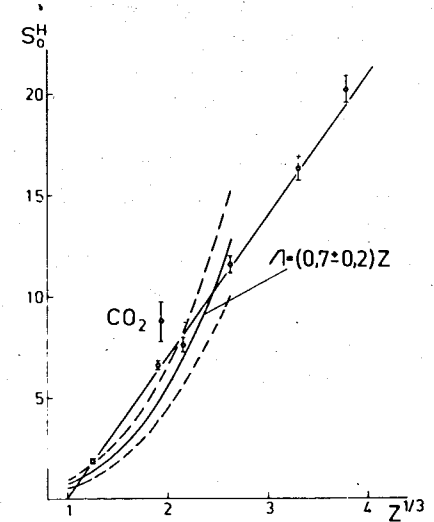


Рис. 5. Зависимость относительной вероятности  $S_0^H$  атомного захвата от атомного номера  $Z$ . Прямая проведена по формуле (11). Здесь же показана зависимость  $\Lambda = 0,7Z$  (7) и пунктиром погрешности в её определении.

служить указанием на доминирующую роль в атомном захвате электронов внешней оболочки. Этим объясняется слабая зависимость  $S_0^H$  от  $Z$ . В таблице I приведены также значения относительных тормозных способностей  $\hat{S}^H$ , вычисленные по таблицам тормозных потерь (*Studies in penetr. of charged part. in matter Publ. 1133, NAS-NRC Washington, D.C. 1964*), и значения  $S^H$ , которые можно рассчитать на основе полученных нами данных и данных работ В.И.Петрухина и др., 1967 г. (величина  $S^H(x)$ ) и Д.Г.Будяшова и др., 1967 г. (величины  $S^H(xx)$ ).  $S^H$  хорошо согласуются с нашими данными. Величины  $\hat{S}^H$  для газов с  $Z \geq 18$  (без  $\text{CO}_2$ ) в пределах ошибок измерений совпадают с нашими величинами  $S_0^H$ , тогда как для тяжёлых газов Kr и Xe  $S_0^H$  значительно меньше  $\hat{S}^H$ . Это означает, что для больших  $Z$  эффективность электронов внутренних оболочек атомов по отношению к атомному захвату ниже, чем при торможении. Захват молекулой  $\text{CO}_2$  почти в 1,5 раза больше величины  $\hat{S}^H$  и значения, предсказываемого интерполяцией по нашим данным для остальных газов.

Установленная на опыте слабая зависимость от  $Z$  относительной скорости перехвата  $\Lambda$  ( $\Lambda \sim Z^{1/3}$ ) обусловлена тем, что в перехвате пионов участвуют возбуждённые состояния мезоатома. В отличие от перехвата  $\mu^-$ -мезонов, когда электронами атомных оболочек из-за малости  $\rho\pi^-$ -мезоатомов ( $\sim 10^{-11}$  см) можно было пренебречь, для возбуждённых  $\rho\pi^-$ -мезоатомов, по-видимому, следует принимать во внимание экранирование заряда ядра атомов электронами внутренних оболочек. Расстояния  $R$  между протоном и ядром  $Z$ , на которых возможен перехват из возбуждённых состояний с  $n = 3$ , оцениваемые в идеальном случае по формулам задачи трёх центров (Л.И.Пономарёв. ЖЭТФ, 55, 1836 (1968)), не учитывающей влияния атомных электронов, оказываются даже больше средних расстояний между атомами смеси. С другой стороны, размеры возбуждённого мезоатома в состояниях с  $n > 3$  сравнимы с размерами электронных оболочек атомов, так что мезоатом при перехвате не может более рассматриваться как квазинейтрон. Характерный вид зависимости  $S_0^H$  от  $Z$  ( $S_0^H \sim Z^{1/3}$ ) можно считать указанием на возможность описания перехвата и атомного захвата мезона в газовых смесях  $\text{H}_2 + Z$  (особенно в случае тяжёлых газов) с помощью статистической модели атома. Квадраты эмпирически определённых радиусов атомов благородных газов Ne, Ar, Kr и Xe растут с  $Z$ , как  $(Z^{1/3} - 1)$  (Х.П.Гамбош. Статистическая теория атома и её применения. ИЛ, М., 1951). Это позволяет сделать вывод, что вероятности атомного захвата мезонов и скорости перехвата благородными газами пропорциональны геометрическим сечениям атомов.

Зависимость относительной скорости перехвата  $\Lambda$  от концентрации  $C$  примеси связана с тем, что перехват происходит из возбуждённых состояний  $\rho\pi^-$ -мезоатома. Поскольку хронологически высоковозбуждённые состояния  $\rho\pi^-$ -мезоатома проходятся сначала, с увеличением концентрации  $C$  вклад перехвата из состояний с высокими номерами возбуждения растёт, что приводит к обеднению заселённости низших состояний  $\rho\pi^-$ -мезоатома ( $n \leq 4$ ), из которых в основном происходит захват пиона протоном по эффекту Дзя-Сноу-Сачера (H.A. Bethe, M. Leon. Phys. Rev. 127, 636 (1962); M. Leon. Phys. Lett. 31B, 87 (1971)). Так как сечение перехвата должно расти с номером возбуждения, будет расти и  $\Lambda$  с увеличением концентрации  $C$ . Обеднение заселённости низших состояний  $\rho\pi^-$ -мезоатома с ростом концентрации  $C$  уменьшает скорость ядерного захвата  $\pi^-$ -мезона протоном, что также приводит к возрастанию  $\Lambda$  с ростом  $C$ . Таким образом, увеличение концентрации атомов  $Z$  в смеси приводит к росту относительной скорости перехвата  $\Lambda = d/a$  сразу за счёт двух механизмов: увеличения числителя  $d$  (перехвата) и уменьшения знаменателя  $a$  (ядерного захвата пионов протонами) из-за обеднения заселённости низших состояний.

Перехват на молекулу  $\text{CO}_2$  составляет примерно половину ожидаемого на основе интерполяции по полученной нами зависимости (II), что указывает на взаимное экранирование атомов в молекуле  $\text{CO}_2$  при перехвате.

Перехват пионов изучался также в газовой смеси  $\text{H}_2 + \text{Ar}$  при давлении водорода  $P = 1$  атм (J. Pikard et al. Lettre al. Nuovo Cimento. 2, 957 (1971)) и в растворе  $\text{H}_2 + \text{Ne}$  (W.M. Bugg et al. Phys. Rev. 5D, 2142 (1972)). Полученные в этих работах результаты в пределах погрешностей измерений согласуются с нашими результатами. Исходя из этого, можно сделать заключение, что в широком интервале изменения плотности водорода  $(5 \cdot 10^{-3} + 1) \rho_{\text{H}_2}^0$  в смесях  $\text{H}_2 + Z$  происходит перехват, интенсивность которого определяется конкуренцией процессов, идущих в столкновениях  $\rho\pi^-$ -мезоатома с атомами (молекулами) примеси и водородом.

В главе IV описывается эксперимент по изучению захвата  $\pi^-$ -мезонов связанным водородом в гидроокисах и OH-кислотах <sup>4,5/</sup>. В качестве мишеней использовались кислоты  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{SeO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , кислая соль  $\text{NaHCO}_3$  и гидроокиси  $\text{Zr}(\text{OH})_4$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Измерения вероятностей захвата  $W_x$  в исследуемых веществах выполнены относительным методом путём сравнения скоростей счёта  $\pi^-$ -мезонов,



образующихся в мишени X и мишени из гидрида лития ( $LiH$ ). Экспериментальные значения  $W_X^3$  для исследованных соединений приведены в таблице II. Там же для сравнения даны ожидаемые значения  $W_X^M$  вероятностей захвата в молекулах  $H_nXO_m$ , вычисленные по формуле

$$W_X^M = \frac{\alpha_0 Z_0^2}{mZ_0^+ Z_X + n} \quad (12)$$

формула (12) даёт модель больших мезомолекул с учётом эффекта тождественных групп (З.В. Крумштейн и др. ЖЭТФ, 55, 1640 (1968); ЖЭТФ, 65, 455 (1973)). Принятое при расчёте значение  $\alpha_0$  для кислорода составляло  $1,28 \pm 0,15$ . Подавление захвата  $\epsilon$  в таблице II, равное  $W_X^M/W_X^3$ , служит мерой отклонения экспериментальных вероятностей от их значений, ожидаемых по модели больших мезомолекул.

Таблица II

Соединение	$W_X^3 \cdot 10^4$	$W_X^M \cdot 10^4$	$\epsilon$	$pK_T$
$H_2SO_4$	$\leq 0,2$	$4,0 \pm 0,5$	$> 20$	-3,0
$HNO_3$	$\leq 0,2$	$6,2 \pm 0,7$	$> 30$	-1,4
$H_2C_2O_4$	$\leq 0,1$	$4,3 \pm 0,5$	$\geq 40$	1,3
$H_2SeO_3$	$0,9 \pm 0,5$	$3,3 \pm 0,4$	$3,7 \pm 2,1$	2,6
$H_3PO_4$	$1,6 \pm 0,4$	$4,0 \pm 0,5$	$2,5 \pm 0,7$	2,1
$NaHCO_4$	$2,1 \pm 0,5$	$4,8 \pm 0,6$	$2,3 \pm 0,5$	3,9
$H_3BO_3$	$5,6 \pm 1,0$	$6,2 \pm 0,7$	$1,1 \pm 0,2$	9,2
$Al(OH)_3$	$5,6 \pm 1,0$	$5,0 \pm 0,6$	$0,9 \pm 0,2$	9,2
$Zr(OH)_4$	$2,6 \pm 0,8$	$2,6 \pm 0,3$	$1,2 \pm 0,4$	-

Из таблицы II следует, что подавление захвата  $\epsilon$  при переходе от гидроокисей к кислотам возрастает более чем на порядок величины. Для сильных кислот  $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$  и щавелевой кислоты  $H_2C_2O_4$  выход  $\pi$ -мезонов от перезарядки (3) не наблюдается. В таблице II приведены верхние граничные оценки вероятностей  $W_X^3$  с 90%-ным уровнем достоверности. На языке модели больших мезомолекул это означает, что электронная плотность у протона в группе Н-О (ионность связи) существенно уменьшается (увеличивается) в ряду от  $Zr(OH)_4$  до  $H_2SO_4$ . В соответствии с убыванием электронной плотности у протона прочность связи протона с кислородом уменьшается, что должно сопровождаться увеличением силы кислоты.

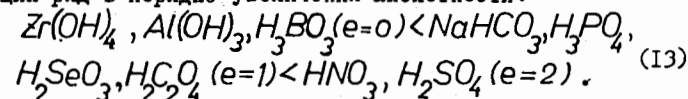
В химической литературе протонные кислоты  $H_nXO_m$  принято располагать в ряды по их относительной силе согласно величинам  $pK_T$  показателей константы диссоциации этих кислот в разбавленных водных

растворах (Ф. Коттон, Дж. Уилкинсон. Современная неорганическая химия. Ч. П. МИР, Москва, 1969; М. К. Дэй, Д. Селбин. Теоретическая неорганическая химия. Химия, Москва, 1969). Значения  $pK_T$  для исследованных нами веществ даны в таблице II. Эмпирически установлено, что кислоты  $H_nXO_m$  можно разбить на четыре различающиеся по силе класса. Внутри каждого класса кислоты примерно одинаковы по силе и имеют одинаковый формальный заряд  $e = m - n$ . Сила кислот растёт по мере увеличения формального заряда  $e$  (добавления числа негидроксильных атомов кислорода). Примерные интервалы значений  $pK_T$  для кислот с различными величинами формального заряда представлены в таблице III.

Таблица III

$e$	0	I	2	3
$pK_T$	7-II	1,5-3	0-3	$\sim$ -10

Согласно классификации, данной в таблице III, и значений  $pK_T$  (таблица II), исследуемые нами вещества следует расположить в следующий ряд в порядке увеличения кислотности:



Сопоставление ряда (13) с расположением кислот по силе в порядке увеличения  $\epsilon$  показывает, что если исключить из рассмотрения  $H_2C_2O_4$ , оба ряда совпадают. Таким образом, наблюдается чёткая корреляция между уменьшением вероятности захвата  $\pi$ -мезонов протонами OH-кислот и увеличением их силы.

Щавелевая кислота  $H_2C_2O_4$  по величине подавления попадает в одну группу с сильными неорганическими кислотами ( $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$ ), хотя по  $pK_T$  её следует отнести к группе кислот с  $e = I$ . Большое значение  $pK_T$  для  $H_2C_2O_4$  может быть связано с подавлением её диссоциации из-за существования в водных растворах ассоциаций, образующихся из молекул  $H_2C_2O_4$  за счёт сильных водородных связей между молекулами кислоты.

Корреляция рядов кислот, построенных на основе изменения подавления  $\epsilon$  и величины  $pK_T$ , означает, что вывод модели больших мезомолекул о характере изменения электронной структуры связи Н-О в ряду  $Zr(OH)_4 + H_2SO_4$  согласуется с предположениями теории электронных смещений в химии. Присоединение к центральному атому X электроотрицательных атомов негидроксильного кислорода приводит к оттягиванию

электронной плотности от центрального атома на атомы негидроксильного кислорода, что, в свою очередь, приводит к уменьшению электронной плотности у протона (увеличению ионности связи H-O).

Полученная нами качественная связь между подавлением  $\epsilon$  и усилением кислотности в ряду  $Zr(OH)_4 + H_2SO_4$  не нарушается, если принять во внимание обнаруженный нами позднее (В.И.Петрухин и др. ЖЭФ, 19, 626 (1974)) перехват  $\pi^-$ -мезонов от  $\rho\pi^-$ -мезоатомов, образующихся на связанном водороде. По нашим данным, его вклад в подавление при переходе от гидроокисей к сильным кислотам составляет  $\lesssim 80\%$ , тогда как наблюдаемый нами эффект превышает порядок величины.

Наблюдение в ряду OH-кислот и гидроокисей качественного соотношения между изменением подавления захвата  $\epsilon$  и изменением силы кислот явилось основой, позволившей правильно предсказать и установить в последующих наших опытах (Л. Вильгельмова и др. ЖЭФ, 65, 24 (1973); В.И.Гольданский и др. ДАН СССР, 214, 1337 и ИОС (1974)) количественные соотношения между величинами, характеризующими захват пионов связанным водородом, и физико-химическими величинами, зависящими от свойств электронной оболочки атома водорода в молекулах.

Таким образом, в экспериментах /1-5/, результаты которых составили основу диссертации:

1. Экспериментально обнаружен перехват  $\pi^-$ -мезонов в смесях водорода с другими газами (He, Ne, Ar, Kr, Xe и  $N_2$ ,  $CO_2$ ).

2. Установлены основные характеристики этого процесса. Показано, что: а) перехват интенсивно происходит при концентрациях примеси  $C \gtrsim 0,1$ ; б) вероятность перехвата не зависит от плотности водорода и определяется только концентрацией  $C$  примеси; в) перехват атомами гелия одинаков по порядку величины с перехватом другими атомами; г) относительная скорость перехвата  $\lambda$  слабо зависит от заряда  $Z$  и концентрации  $C$  атомов примеси ( $Z \sim \lambda^{1/3}$ ,  $C \sim \lambda^{1/3}$ ); д) приведенная константа перехвата пионов на два порядка величины превышает приведенную константу перехвата мезонов; е) скорость перехвата на молекулу  $CO_2$  меньше суммы скоростей перехвата на составляющие её атомы, что обусловлено взаимным экранированием атомов.

Эти особенности качественно можно связать с тем, что перехват  $\pi^-$ -мезонов происходит из возбужденных состояний  $\rho\pi^-$ -мезоатомов в конкуренции с процессами девозбуждения  $\rho\pi^-$ -мезоатомов и ядерным захватом пионов протонами, идущими в столкновениях  $\rho\pi^+ H_2$ .

3. Определены относительные вероятности атомного захвата пионов в смесях  $H_2 + Z$  ( $Z$  суть He, Ne, Ar, Kr, Xe и  $N_2$ ,  $CO_2$ ); относительная (по водороду) вероятность захвата  $S_0^H$  компонентой  $Z$  смеси (исключая  $CO_2$ ) слабо зависит от заряда  $Z$  ( $\sim Z^{1/3}$ ). Для молекулярного газа  $CO_2$  вероятность атомного захвата больше, чем это следует из зависимости, установленной по остальным газам.

4. Показано, что отношение вероятностей захвата пионов атомами  $Z$  и H и относительная скорость перехвата в смесях  $H_2 + Z$ , где  $Z$  - благородные газы и азот, определяются одной и той же зависимостью от атомного номера  $Z$ :  $S_0^H = (7,1 \pm 0,1)(Z^{1/3} - 1)$ ,  $\lambda = S_0^H C^{1/3}$ .

5. В ряду гидроокисей и OH-кислот установлена резкая зависимость между подавлением вероятности  $W$  ядерного захвата  $\pi^-$ -мезонов связанным водородом и увеличением силы кислоты. Представления модели больших мезомолекул о важной роли усиления ионности связи O-H в уменьшении вероятности захвата  $W$  согласуются с представлениями теории электронных смещений в химии. По нашим данным, щавелевая кислота относится к группе сильных кислот, тогда как по принятой в химии классификации она на класс слабее.

Результаты, использованные в диссертации, докладывались на IY Международной конференции по физике высоких энергий и структуре ядра (Дубна, 7-11 сент. 1971 г.), на 2-ом Всесоюзном совещании по элементарным процессам в химии высоких энергий, 1971 г., на сессиях Отделения ядерной физики АН СССР, а также вошли в цикл работ, отмеченных в 1972 году первой премией ОИЯИ за научную работу.

#### Литература

1. В.И.Петрухин, Д.Д.Прокошкин, В.М.Суворов. ЖЭФ, 55, 2173 (1968).
2. В.И.Петрухин, В.М.Суворов. IY Международная конференция по физике высоких энергий и структуре ядра. Дубна, 7-11 сент. 1971, аннотации докладов, ДИ-5988, стр.96, Дубна, 1971.
3. В.И.Петрухин, В.М.Суворов. Препринт ОИЯИ, PI-9136, Дубна, 1975.
4. З.В.Крумштейн, В.И.Петрухин, Л.М.Смирнова, В.М.Суворов, И.А.Джландов. Препринт ОИЯИ, PI2-5224, Дубна, 1970.
5. З.В.Крумштейн, В.И.Петрухин, Л.М.Смирнова, В.М.Суворов, И.А.Джландов. IY Международная конференция по физике высоких энергий и структуре ядра. Дубна, 7-11 сент. 1971, аннотации докладов, ДИ-5988, стр. 93, Дубна, 1971.

Рукопись поступила в издательский отдел  
9 апреля 1976 года.