

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Д-606

13-82-626

ДОДОНОВ
Валерий Хажисетович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
ИОНИЗАЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ
НА ОСНОВЕ АРГОНА
И КСЕНОНА БОЛЬШОЙ ПЛОТНОСТИ**

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна 1982

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

В.А.ЖУКОВ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

Б.А.ДОЛГОШЕИН

кандидат физико-математических наук

Б.Ж.ЗАЛИХАНОВ

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт физики высоких энергий (г.Серпухов).

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1982 г.
в " _____ " часов на заседании Специализированного совета Д 047.01.03
при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных
исследований г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1982 г.

Ученый секретарь Совета
доктор физико-математических наук

Д.А.БАТУСОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В течение последнего десятилетия во многих лабораториях мира ведутся разработки методов регистрации частиц с помощью электронных детекторов, рабочей средой которых служат аргон и ксенон большой плотности (камер и счетчиков высокого давления, детекторов на конденсированных аргоне и ксеноне). Интерес к ним обусловлен тем, что использование плотного вещества ведет к прогрессу в решении многих проблем, таких, например, как точное определение координат частиц, измерение энергии частиц спектрометрами полного поглощения, регистрация гамма-квантов и нейтрино, изучение реакций, идущих с очень малыми сечениями. Однако на практике такие детекторы применяются для решения ограниченного числа задач. В отдельных случаях, а именно для регистрации частиц в диапазоне средних энергий, где ионизационные камеры на жидком аргоне или ксеноне могут иметь определенные достоинства в сравнении с используемыми приборами, вообще отсутствуют соответствующие разработки. Имеет место также недостаточность или противоречивость данных об ионизационных процессах, происходящих в плотной среде, что затрудняет применение рассмотренных детекторов в практике физического эксперимента.

Цель работы. Целью работы являлось изучение процессов ионизации, происходящих в плотном газовом или конденсированном веществе, а также разработка и создание детектора частиц-многосекционной ионизационной камеры на жидком аргоне, предназначенной для регистрации частиц в области средних энергий и исследование её рабочих характеристик. Для этого была создана экспериментальная установка, включавшая, помимо детекторов, систему их термостатирования, систему очистки и контроля чистоты газа, электронное и высоковольтное оборудование.

Новизна работы. Новизна результатов диссертации заключается в следующем:

- внесена определенность в данные о детектирующих свойствах счетчиков на основе твердого аргона и ксенона, выявлены особенности ионизационного режима в твердой фазе и сделаны оценки параметров, характеризующих этот режим работы;

- получены систематические экспериментальные данные, отражающие свойства пропорциональных счетчиков при переходе к большим плотнос-

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

там как при повышении давления, так и при снижении температуры при высоком давлении;

- при высоких давлениях в смеси аргона с ксеноном обнаружен "неметабильный эффект Пеннинга", который приводит к росту ионизации в лавине. При специфических условиях высокого давления установлены зависимости $\alpha/P = f(E/P)$, где α - первый коэффициент ионизации Таунсенда в аргоне, ксеноне и их смеси. Показано, что использование аргона с небольшой (~0,5%) примесью ксенона в пропорциональных счетчиках высокого давления обеспечивает значительное улучшение их характеристик - снижает рабочее напряжение в 1,5-2 раза и улучшает их энергетическое разрешение.

- Создана многоэлектродная ионизационная камера на жидком аргоне, предназначенная для определения энергии и идентификации частиц с точностью ~150 кэВ в области энергий $\leq 100 - 200$ МэВ.

Практическое значение диссертации заключается в том, что её результаты могут быть использованы (и в настоящее время уже используются) для развития методов регистрации частиц. Было показано в совместном предложении МИФИ-ОИЯИ-ИТЭФ, что использование смеси аргона с ксеноном дает возможность создания детектора нейтрино с массой в сотни тонн. Жидкоаргоновая ионизационная камера и установка по очистке и контролю чистоты газа могут быть использованы на ускорителях в экспериментах по изучению упругих и неупругих адрон-ядерных взаимодействий при средних энергиях.

Положения диссертации, представленные для защиты, отражают основные результаты диссертации и включают:

1. Экспериментальные результаты, отражающие особенности ионизационного режима в твердом аргоне и ксеноне, а также оценки некоторых факторов, характеризующих детектирующие свойства счетчиков на их основе.

2. Характеристики пропорциональных счетчиков, отражающие изменение их детектирующих свойств при переходе к большим плотностям, полученные в различных экспериментальных условиях.

3. Обнаруженный в смеси аргона с ксеноном при высоких давлениях "неметабильный эффект Пеннинга" и экспериментальное подтверждение существенного улучшения характеристик пропорциональных счетчиков высокого давления при заполнении их смесью аргона с ксеноном.

4. Зависимости первого коэффициента Таунсенда от отношения E/P в аргоне, ксеноне и их смеси, установленные при специфических условиях высокого давления.

5. Детектор частиц - многосекционную камеру, предназначенную

для регистрации, идентификации и определения энергии заряженных частиц (протонов, P^+ мезонов) в области средних (~100-200 МэВ) энергий и результаты исследования её характеристик.

6. Предложения по практическому использованию результатов диссертации.

Апробация работы. Результаты работы регулярно обсуждались на научно-методических семинарах Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, докладывались на сессиях ОЯФ АН СССР (февраль 1977 и 1982 гг.), на 3 международном совещании по методике пропорциональных и дрейфовых камер (г. Дубна, 1978). По материалам диссертации опубликовано 10 работ /1-10/ в журналах ЖЭТФ, ПТЭ, ЖТФ, а также в виде препринтов и сообщений ОИЯИ.

Объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения общим объемом 147 страниц, включая 45 рисунков и 5 таблиц. Список литературы содержит 164 названия.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В диссертации можно выделить два раздела:

- исследование газовых пропорциональных счетчиков высокого давления на основе аргона и ксенона и
- разработка и исследование детекторов на конденсированных аргоне и ксеноне.

Во введении к диссертации приводятся общие сведения о работе, отмечается актуальность темы и её связь с планом научно-исследовательских работ ОИЯИ, а также дается краткое изложение содержания диссертации.

Первая глава диссертации представляет собой обзор работ, связанных со счетчиками высокого давления, а также работ, посвященных детекторам на конденсированных аргоне и ксеноне.

Необходимо отметить, что в литературе отсутствует систематическое исследование характеристик счетчиков высокого давления, тем не менее они успешно использовались для решения ряда задач. Как можно видеть, высокое давление, в принципе, не является препятствием для пропорционального размножения электронов вблизи анода счетчика. Вместе с тем, увеличение плотности традиционных газов и смесей, осуществляемое без анализа процессов, происходящих в объеме счетчика, приводит к неприятным следствиям, а именно, к увеличению рабочего напряжения счетчика, снижению скорости дрейфа носителей заряда, что отражается на временных характеристиках счетчика и ухудшению энергетического разрешения, что вынуждает работать с низкими коэффициентами газового усиления.

В разработках детекторов на основе конденсированного аргона и ксенона можно выделить ряд направлений, получивших наибольшее развитие:

- координатные детекторы, опытные образцы которых позволяют достигать разрешения $\pm 8,5$ мкм в камерах с дискретным съемом и ± 20 мкм в самоуправляемых дрейфовых камерах;
- спектрометрия электронов и гамма-квантов при низких энергиях. Достигнутое разрешение составляет 33 кэВ fwhm для энергии электронов 1 МэВ в жидком аргоне и 46 кэВ fwhm для гамма-квантов с энергией 660 кэВ в жидком ксеноне.

- Калориметры на жидком аргоне, которые, в отличие от перечисленных выше детекторов на жидком аргоне и ксеноне, широко используются в экспериментах на современных ускорителях. Как показала практика их использования, они отличаются высоким энергетическим разрешением, возможностью адаптации к условиям эксперимента, простой калибровкой и рядом других достоинств.

Широкое использование детекторов на конденсированном аргоне и ксеноне в экспериментах несколько ограничивает низкая скорость дрейфа электронов ($\sim 200-300$ нс/мм), а также проблемы, связанные с использованием низких температур и с очисткой газа, в особенности ксенона.

Во второй главе приводятся результаты исследования детектирующих свойств цилиндрических счетчиков, заполняемых жидким и твердым аргоном и ксенонем. В частности, изучалась возможность размножения электронов в твердой фазе, указания на которую были ранее получены рядом авторов. Результаты этой главы указывают на то, что для счетчиков на основе твердого аргона и ксенона характерным является ионизационный режим работы с некоторыми особенностями.

На рис. I видно, что в амплитудном распределении для твердого аргона и ксенона наряду с основной частью спектра, соответствующей ионизационным импульсам, наблюдается протяженный "хвост" импульсов с большими амплитудами. С ростом напряжения на счетчике амплитуда и интенсивность этих импульсов заметно возрастают. С другой стороны, как амплитуда, так и интенсивность больших импульсов с течением времени уменьшались, тогда как основной спектр не испытывал заметных изменений. Зависимость амплитуды и интенсивности импульсов "хвоста" от напряжения проявлялась в своеобразном эффекте "гистерезиса" счетной характеристики, который заключался в том, что при одном и том же значении напряжения число импульсов, сосчитываемых счетчиком, было больше, когда напряжение росло, и меньше, когда оно снижалось. Не-

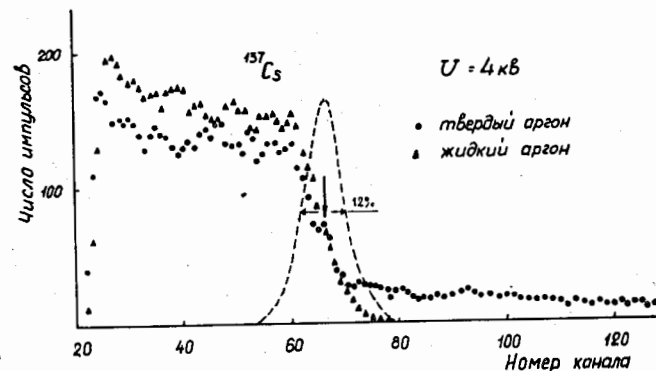


Рис. I. Спектр импульсов от гамма-квантов ^{137}Cs для счетчика, заполненного твердым аргоном.

смотря на наблюдаемое усиление части импульсов, для счетчиков на твердом аргоне и ксеноне характерен ионизационный режим, а отмеченные эффекты могут быть удовлетворительно объяснены наличием вблизи анода счетчика микрообластей или микрополостей, в окрестности которых может происходить размножение электронов.

Было найдено также, что амплитуда сигнала в твердой фазе, как правило, была выше, чем в жидкой фазе, что указывает на то, что в кристаллах захват электронов примесями меньше влияет на величину выходного сигнала. Аппроксимируя амплитудную характеристику выражением

$$Q = \frac{1}{\Gamma_k} \int_{r_a}^{r_k} \frac{Q_0 \ln(r/r_a)}{1 + K/E(r) \ln(r_k/r_a)} dr$$

где Q - величина собираемого на аноде заряда, Q_0 - начальный заряд электронов, K - коэффициент рекомбинации, $E(r)$ - напряженность поля, r_a , r_k - радиус анода и катода, можно получить оценку коэффициента рекомбинации

$$\begin{aligned} K_{\text{тв. Ar}} &= 0,41 \pm 0,03 \text{ кВ/см} \\ K_{\text{ж. Ar}} &= 0,52 \pm 0,02 \text{ кВ/см} \\ K_{\text{тв. Xe}} &= 0,19 \pm 0,08 \text{ кВ/см} \\ K_{\text{ж. Xe}} &= 0,41 \pm 0,02 \text{ кВ/см} \quad (\text{E. Shibamura e.a.}). \end{aligned}$$

Сравнение со значениями, полученными в жидкости, указывает на то, что рекомбинация в твердой фазе меньше, чем в жидкой.

Соответствующие оценки энергетического разрешения счетчиков дают величину $\sim 12\%$ fwhm для жидкого и твердого аргона и $\sim 15\%$ для твердого ксенона при $E_\gamma = 660$ кэВ.

В третьей главе рассмотрены свойства газовых пропорциональных счетчиков и некоторые закономерности газового усиления при больших плотностях. Свойства счетчиков, которые заполнялись аргоном, ксеноном и смесями на их основе, изучались в разных экспериментальных условиях: при высоких (достигавших 100 атм) давлениях, при высоких давлениях и низких температурах.

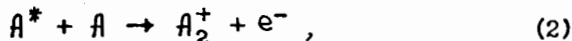
Изучение традиционных газовых наполнителей – аргона, ксенона и смеси аргона с многоатомным газом – метаном показало, что рост давления в счетчиках приводит к нестабильности в работе, уменьшению газового усиления, значительному возрастанию рабочего напряжения и плохому энергетическому разрешению. Связано это с рядом причин – со снижением подвижности носителей заряда, сокращением длины свободного пробега электронов. Большую роль также играют процессы с участием возбужденных атомов газа, ведущие к образованию возбужденных молекул и появлению большого числа фотонов с последующей фотоэмиссией электронов и преждевременным развитием коронного разряда.

Здесь интерес представляют смеси инертных газов. Как оказалось, в смеси аргона с ксеноном возможна дополнительная ионизация атомов примеси ксенона в реакции



Отличие этого эффекта от хорошо известного эффекта Пеннинга заключается в том, что в (I) атом аргона находится в неметастабильном возбужденном состоянии с временем жизни 10^{-8} с., энергия которого выше потенциала ионизации ксенона. При высоких давлениях, когда возрастает частота столкновений между атомами, вероятность ионизирующего столкновения с примесью растет, и для 10 атм эффект будет заметен уже при концентрации ксенона $\sim 1\%$. В соответствии со сделанными предположениями было найдено, что добавление незначительного количества ($\sim 0,5\%$) ксенона в аргон приводит к стабильной работе счетчиков в течение длительного времени и существенно улучшает его характеристики – уменьшает в 1,5 – 2 раза рабочее напряжение (рис. 2) и в 1,5–1,8 раз улучшает энергетическое разрешение, которое к тому же в меньшей степени зависит от давления.

Полученные при специфических условиях высокого давления из сравнения характеристик различных счетчиков зависимости $\Delta/P = f(E/P)$ (рис.3) отражают рост ионизации как в смеси аргона с ксеноном за счет реакции (I), так и в чистых аргоны и ксеноны при высоких давлениях за счет реакции ассоциативной ионизации



в которой энергия возбуждения A^* превышает порог этой реакции, равный 14,7 эВ для аргона и 11,16 для ксенона.

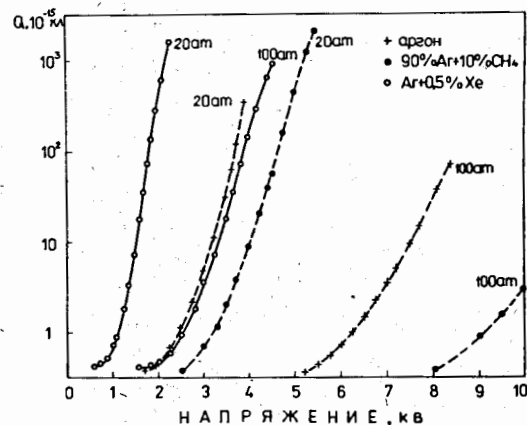


Рис. 2.

Амплитудные характеристики счетчика, заполненного Ar, Ar + 0,5% Xe и Ar + 10% CH₄.

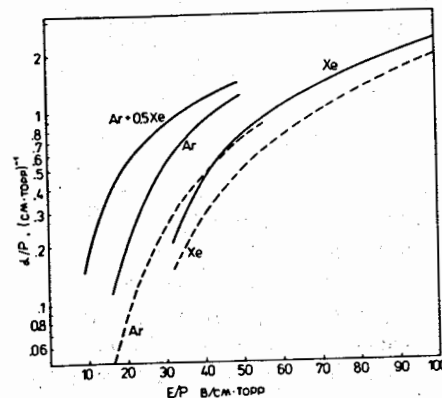


Рис. 3

Зависимость $\Delta/P = f(E/P)$ для аргона, ксенона и смеси Ar + 0,5% Xe при высоких давлениях. (---) данные Крютхофа при давлениях до 1 атм.

В четвертой главе диссертации описываются конструкция и результаты испытания многосекционной жидкоаргоновой ионизационной камеры. Камера действует как пробный телескоп и вместе с измерением пробега (энергии) частицы в диапазоне средних ($\sim 100-200$ МэВ) энергий позволяет по ионизации определять сорт частицы. Детектирующая часть камеры (рис.4) представляет собой стопку тонких (~ 20 мкм) электродов, разделенных промежутками в 1,8 мм. Электроды образуют 24 секции камеры, каждая из которых соединена с отдельным предусилителем и далее через усилитель и АЦП с анализатором. Схема прибора представлена на рис. 5. Для проверки чувствительности камеры к ионизирующему излучению камера облучалась гамма-квантами от внешних источников

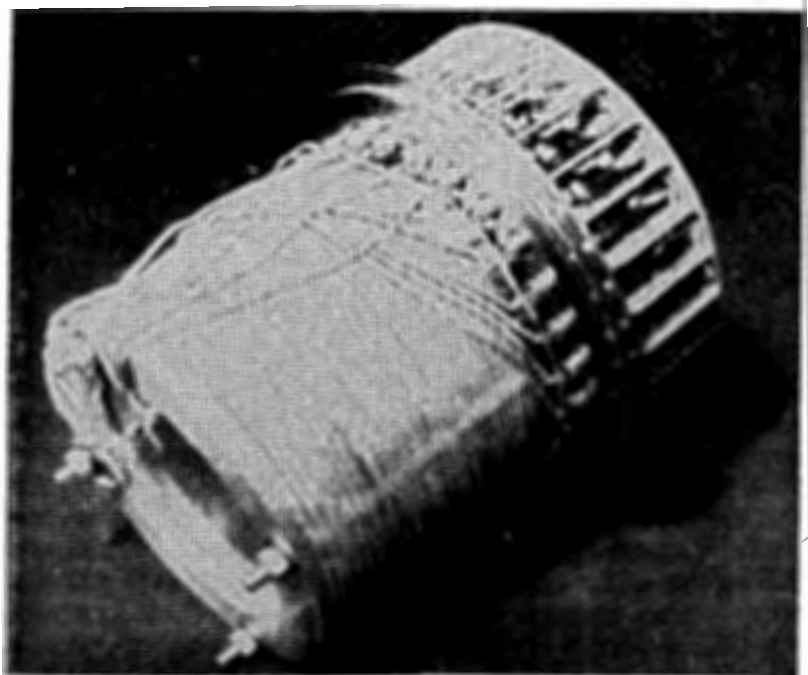


Рис. 4. Детектирующая часть жидкоаргоновой камеры.

^{60}Co и ^{137}Cs , которые позволяли наблюдать работу одновременно всех секций камеры, а также α -частицами от источников, нанесенных на поверхность электродов в нескольких секциях камеры. В дополнение к этому была проведена экспозиция камеры в космических лучах. Результаты показывают, что энергетическое разрешение камеры определяется, в основном, шумами электроники и составляет ~ 150 кэВ $fwhm$, что позволяет регистрировать в отдельной секции камеры сигнал от минимально ионизирующей частицы.

Глубина камеры достаточна для того, чтобы в ней полностью укладывался пробег протонов с энергией до 120 МэВ и P^+ -мезонов с энергией до 50 МэВ. Энергию частицы можно оценить, измерив её пробег, что нетрудно сделать с помощью несложной электроники, выделив секцию, в которой произошла остановка частицы. Оценки показывают, что при использовании эмпирического соотношения, связывающего пробег частицы с её энергией, одновременно с определением места остановки частицы и величины ионизации только в двух предыдущих секциях, точность измерения пробега составит ≤ 200 мкм.

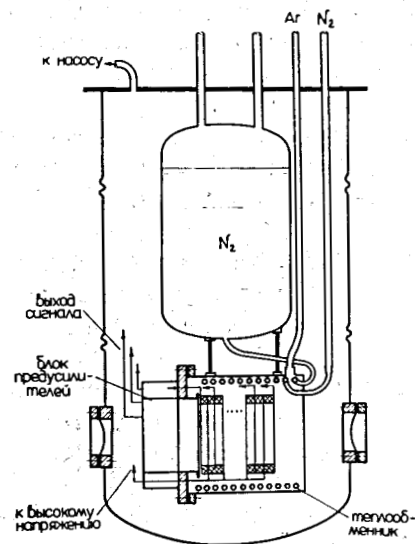


Рис. 5

Схема жидкоаргоновой ионизационной камеры.

Работа с камерой показала, что она достаточно проста в эксплуатации и имеет стабильные характеристики при работе в течение длительного времени. Через сутки величина выходного сигнала сохраняется с точностью ± 1 канал, а в конце сеанса, достигавшего недели, отклонение составило ± 4 канала (цена канала ~ 20 кэВ).

Камера может быть использована для спектрометрии и идентификации частиц. Точность измерения ионизации в отдельной секции жидкоаргоновой камеры несколько хуже, чем в телескопах из ППД (150 кэВ против 90 кэВ для ППД), однако среди достоинств камеры следует отметить большую апертуру ($\phi 10$ см) и большой активный объем (~ 3 литра), который при необходимости может быть увеличен, а также отсутствие чувствительности к радиационным повреждениям, что делает камеру способной конкурировать с имеющимися детекторами или дополнять их.

Вывод содержит краткий обзор полученных результатов, а также некоторые рекомендации по возможному их применению в практике.

В Приложении к диссертации включены численные значения некоторых параметров и различные зависимости, характеризующие аргон и ксенон как рабочую среду детекторов ионизирующих излучений.

Публикации

Гребинник В.Г., Додохов В.Х., Жуков В.А., Лазарев А.Б., Ноздрин А., Писарев А.Ф., Столупин В.А., Травкин В.И. Исследование детектирую-

- ших свойств счетчика, заполненного твердым аргонном. ЖЭФ, 1976, т. 71, вып.2(8), с. 417-423.
2. Гребинник В.Г., Додохов В.Х., Жуков В.А., Лазарев А.Б., Ноздрин А.А., Столупин В.А., Травкин В.И. Исследование детектирующих свойств счетчика, заполненного твердым ксеноном. Дубна, 1977, 12 с. (препринт ОИЯИ, Р13-III65).
 3. Гребинник В.Г., Додохов В.Х., Жуков В.А., Лазарев А.Б., Ноздрин А.А., Писарев А.Ф., Столупин В.А., Травкин В.И. Исследование работы газовых пропорциональных счетчиков при давлениях до 100 атмосфер. ПТЭ, 1978, № 5, с. 62-66.
 4. Гребинник В.Г., Додохов В.Х., Жуков В.А., Лазарев А.Б., Ноздрин А.А., Столупин В.А., Травкин В.И. Исследование пропорциональных счетчиков высокого давления при низких температурах. ПТЭ, 1978, № 5, с. 66-68.
 5. Додохов В.Х., Жуков В.А., Лазарев А.Б., Ноздрин А.А., Столупин В.А., Травкин В.И., Характеристики пропорциональных счетчиков при высоких давлениях. Дубна, 1978, 10 с. (Сообщение ОИЯИ, Р13-II869).
 6. Гребинник В.Г., Додохов В.Х., Жуков В.А., Лазарев А.Б., Ноздрин А.А., Столупин В.А., Травкин В.И. Исследование пропорционального счетчика высокого давления, заполненного смесью аргона и ксенона при низких температурах. Дубна, 1978, 8 с. (Сообщение ОИЯИ, Р13-II870).
 7. Гребинник В.Г., Додохов В.Х., Жуков В.А., Лазарев А.Б., Ноздрин А.А., Столупин В.А., Травкин В.И. Исследование газового пропорционального счетчика, заполненного смесью аргона и ксенона, имеющей большую плотность. В кн.: Пропорциональные и дрейфовые камеры. Труды III международного совещания. Дубна, 1978, ОИЯИ, I3-II807, с. 304-307.
 8. Додохов В.Х., Жуков В.А. Первый коэффициент Таунсенда в аргоне, ксеноне и их смеси. ЖЭФ, 1981, т.5, вып. 9, с. I858-I864.
 9. Акимов Ю.К., Додохов В.Х., Жуков В.А., Калинин А.И., Нгуен Нгок Лам, Тшииков В.К., Шилов С.Н. Многосекционная жидкоаргоновая ионизационная камера. Устройство и результаты испытания. Дубна, 1980, 9 с. (Сообщение ОИЯИ Р13-80-605).
 10. Акимов Ю.К., Додохов В.Х., Жуков В.А., Калинин А.И., Нгуен Нгок Лам, Тшииков В.К., Шилов С.Н. Предусилитель для многосекционной жидкоаргоновой ионизационной камеры. Дубна, 1980, 4 с. (Сообщение ОИЯИ- Р13-80-618).

Рукопись поступила в издательский отдел
13 августа 1982 года.