

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-2008-171

На правах рукописи
УДК 533.5+537.563.3

ТИХОМИРОВ
Александр Васильевич

**МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИИ
ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ ЦИКЛОТРОННЫХ
КОМПЛЕКСОВ**

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2008

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

кандидат технических наук

Б. Н. Гикал (ЛЯР ОИЯИ)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Л. М. Онищенко (ЛЯП ОИЯИ)

доктор физико-математических наук

Н. К. Абросимов (ПИЯФ, Гатчина)

Ведущая организация:

Научно-исследовательский институт
электрофизической аппаратуры
(НИИЭФА), С.-Петербург

Защита состоится "___" _____ 2008 г. в "___" на заседании
диссертационного совета Д-720.001.03 в Объединенном институте ядерных
исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Объединенного
института ядерных исследований

Автореферат разослан "___" _____ 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Ю. А. Батусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Развитие атомной и ядерной физики, а также прикладных областей науки и техники, требует постоянной разработки и совершенствования методов и техники получения высокоинтенсивных пучков ускоренных ионов.

В настоящее время ускорительная база Лаборатории ядерных реакций им. Флерова ОИЯИ представлена четырьмя действующими циклотронными комплексами на основе изохронных циклотронов тяжелых ионов У-200, У-400, У-400М¹ и ИЦ-100².

Ускорители У-400, У-400М и ИЦ-100 оборудованы современными источниками ионов электронно-циклотронного резонанса (ECR)³ и системами аксиальной инжекции пучка, У-200 имеет внутренний источник ионов типа PIG.

Циклотроны ЛЯР ускоряют ионы с отношением заряда к массе иона q/A $0.03 \div 0.5$ до энергии от 0,5 до 100 МэВ/нуклон. Зарядовые состояния ионов, получаемые в источниках ионов для ускорения пучков ионов в циклотронных комплексах ЛЯР, лежат в интервале от $1 \div 2$ для легких ионов до $20 \div 25$ для тяжелых ионов, например, ксенона.

Реализован проект ускорения радиоактивных пучков DRIBs (Dubna Radioactive Ion Beams)^{4,5} на основе циклотронного комплекса У-400 и У-400М. Развитая сеть действующих каналов транспортировки пучков на экспериментально-физические установки ЛЯР продолжает увеличиваться с созданием новых установок, таких как масс-сепаратор MASHA (Mass Analyzer of Super Heavy Atoms).

Для получения максимальной интенсивности пучка на мишени физических установок среди наиболее актуальных задач стоит задача снижения потерь ускоряемых пучков в каналах инжекции, вакуумных камерах циклотронов и в линиях транспортировки ускоренных ионов. Это позволяет снизить время

¹ B.Gikal, G.Gulbekyan, V.Kutner. Recent developments at Dubna U400 and U400M. Proc. of the 15th Inter. Conf. on Cyclotrons and Their Application, Caen, France, 1998, p. 587.

² B.N. Gikal, G.G. Gulbekyan et. al. Upgrading of IC-100 Cycle Implantator. Communication of JINR, P9-2003-121, Dubna, Russia, 2003.

³ A.Efremov et al., Rev. Sci. Inst., Vol. 65 (4), 1994, p.1084.

⁴ R.Oganessian, G.Gulbekyan et al. Radioactive ion beam project with the U400-U400M cyclotron complex. Proc. of the 14th Inter. Conf. on Cyclotrons and Their Application, Cape Town, South Africa, 1995, p. 659.

⁵ V.V.Bashevoy, M.N.El-Shazly, G.G.Gulbekian, M.V.Khabarov, I.V.Kolesov, V.N.Melnikov, R.Ts.Oganessian, A.V.Tikhomirov. The study of the transmission efficiency of the DRIBs transport lines. Nuclear Physics A 701 (2002), pp. 592-596.

экспозиции физической мишени, а также уменьшить радиационный фон от активации оборудования ускорительных установок.

Особую актуальность задача снижения потерь ускоряемых пучков приобретает при ускорении ионов редких и дорогих изотопов, например, изотопа ^{48}Ca , который используется в ЛЯР для исследования ядерных реакций синтеза новых элементов с числом протонов в ядре $Z=110\div 118$.

Одной из основных составляющих потерь пучков ионов, инжектируемых, ускоряемых и транспортируемых на мишени физического эксперимента, является потеря ионов вследствие их перезарядки на молекулах остаточного газа в вакуумных камерах ускорительных установок. Оптимальные вакуумные системы циклотронного комплекса должны обеспечить необходимую эффективность прохождения пучков ионов через вакуумные камеры в процессе инжекции ионов, ускорения и транспортировки ускоренных пучков на экспериментально-физические установки. Для этого вакуумные системы должны иметь достаточную производительность средств вакуумной откачки при их рациональном размещении с учетом различных газовых нагрузок. Мощности вакуумных насосов должны быть достаточными с разумным «запасом прочности» при минимальной стоимости оборудования вакуумных систем.

Цель работы

1. Проведение экспериментальных исследований процесса взаимодействия ионов пучка с молекулами остаточного газа в циклотронах У-400, У-400М, ИЦ-100, ДС-60, измерение сечений перезарядки ионов на молекулах остаточного газа. Анализ и сравнение полученных данных с результатами, полученными на ускорителях других научных центров.
2. На базе экспериментальных данных разработка методики расчета вакуумных систем и численного моделирования вакуумных потерь пучка ионов в процессе инжекции, ускорения и транспортировки пучка на физические установки.
3. Применение разработанной методики для оптимизации вакуумных систем при модернизации существующих и создании новых циклотронных комплексов. Проведение сравнительного анализа результатов расчета и экспериментальных данных, полученных на созданных ускорителях.

Научная новизна и практическая ценность работы

1. Экспериментально исследованы процессы взаимодействия ионов с молекулами остаточного газа в циклотронах У-400, У-400М, ИЦ-100, ДС-60. Измерены значения сечений перезарядки ионов на молекулах остаточного газа.

2. На базе результатов экспериментальных исследований на циклотронах ЛЯР и анализа опубликованных данных, полученных на ускорителях других научных центров, разработана методика и соответствующие программы для численного моделирования вакуумных потерь ионов в процессе инъекции пучка в циклотрон, ускорения и транспортировки пучка ионов на физические установки. Методика описывает процесс перезарядки ионов от водорода до урана с энергией от 1 кэВ/нуклон до 100 МэВ/нуклон.
2. Разработаны методика и соответствующие программы для численного моделирования распределения давления в азимутально-симметричных вакуумных камерах, а также в протяженных вакуумных камерах произвольного поперечного сечения с произвольным расположением неограниченного количества различных по производительности средств вакуумной откачки при произвольных газовых нагрузках (сосредоточенных и распределенных).
3. Результаты исследований и разработанная методика численного моделирования потерь пучка ионов нашли практическое применение при модернизации вакуумных систем циклотронных комплексов У-400, У-400М и ИЦ-100.
4. Разработанная методика и программы численного моделирования потерь пучка ионов применены для оптимизации вакуумных систем при создании

циклотронных комплексов

ЦИТРЕК (г. Дубна),

ДС-72 (Словацкая циклотронная лаборатория, г.Братислава, Словацкая Республика) и

ДС-60 (Междисциплинарный научно-исследовательский комплекс, г. Астана, Казахстан);

инжектора линейного ускорителя Словацкого технического университета (г. Братислава);

тракта транспортировки радиоактивных пучков ускорительного комплекса DRIBs на основе циклотронов У-400 и У-400М;

экспериментально-физической установки масс-сепаратора MASHA (Mass Analyzer of Super Heavy Atoms).

Выполненный цикл исследований и разработанная методика расчета позволяет оптимально конструировать вакуумные системы циклотронных комплексов и физических установок.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на Международных и Национальных конференциях, в том числе:

- XXXI European Cyclotron Progress Meeting, Groningen, Netherlands, September 18-20, 1997;
- VI European Particle Accelerator Conference 98, Stockholm, Sweden, June 22-26, 1998;
- III International School and Workshop on Cyclotron and Applications, Cairo, Egypt, February 6-11, 1999;
- First Vacuum and Surface Sciences Conference of Asia and Australia, Tokyo, Japan, September 8-10, 1999;
- Int. Workshop on Ion Sources for DRIBs project, JINR, FLNR, Dubna, December 7-11, 1999;
- V Int. Conference on Radioactive Nuclear Beams, Divonne, France, April 3-8, 2000;
- VI Int. Computational Accelerator Physics Conference, Darmstadt, Germany, September 11-14, 2000;
- IV International School and Workshop on Cyclotron and Applications, Cairo, Egypt, February 17-21, 2001;
- VII European Vacuum Conference, Madrid, Spain, September 17-20, 2001;
- VIII European Vacuum Congress, Berlin, June 23-26, 2003;
- Scientific seminar in the National Superconducting Cyclotron Laboratory, Michigan State University, East Lansing, MI, USA, October 24, 2003;
- IVC-16/ICSS-12/NANO-8 International Vacuum Congress, Venice, Italy, June 28- July 2, 2004;
- 19th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'04), Dubna, Russia, October 4-8, 2004;
- XXXIV European Cyclotron Progress Meeting, Belgrade, Serbia and Montenegro, October 6-8, 2005;
- XL PNPI Winter School, Repino, St.-Petersburg, Russia, February 15-19, 2006;
- VI Iberian Vacuum Meeting IVM-6, Salamanca, Spain, June 26-28, 2006;
- XIV Russian Scientific and Technical Conference with participation of foreign specialists "Vacuum Science and Technique", Sochi, Russia, October 9-14, 2007;
- X European Vacuum Conference, Balatonalmadi, Hungary, September 21-26, 2008.

Публикации

Основное содержание диссертации опубликовано в 26 работах, в том числе в 7 реферируемых российских и иностранных журналах.

На защиту выносятся следующие положения, результаты и разработки:

1. Результаты экспериментальных исследований процессов перезарядки ионов на остаточном газе, выполненных на ускорителях ЛЯР, сравнение полученных данных с результатами исследований на ускорителях других научных центров.
2. Разработанная на базе экспериментальных данных методика численного моделирования вакуумных потерь ионов при их инжекции в циклотрон, ускорении и транспортировке на экспериментально-физическую установку.
Методика охватывает диапазон масс ионов от протона до урана с энергией от 1 кэВ/нуклон до 100 МэВ/нуклон.
3. Методика численного моделирования распределения давления в азимутально-симметричных вакуумных камерах, а также в протяженных вакуумных камерах произвольного поперечного сечения с произвольным расположением неограниченного количества различных вакуумных насосов в расчетной схеме.
4. Разработанная методика расчета распределения давления в вакуумных камерах ускорителей и моделирование потерь пучка ионов вследствие перезарядки ионов на молекулах остаточного газа были применены для оптимизации вакуумных систем при модернизации циклотронов У-400, У-400М и ИЦ-100.
5. Разработанная методика численного моделирования использована для оптимизации вакуумных систем циклотронов, каналов инжекции и транспортировки ускоренных пучков циклотронных комплексов
 - DC-72 (Словацкая циклотронная лаборатория, г.Братислава, Словацкая Республика) и
 - DC-60 (Междисциплинарный научно-исследовательский комплекс, г. Астана, Казахстан).
6. Разработанная методика моделирования была использована при проектировании вакуумных систем
 - канала транспортировки радиоактивных пучков ускорительного комплекса DRIBs, созданного в ЛЯР на базе циклотронов У-400 и У-400М,
 - экспериментально-физической установки масс-сепаратора MASHA (Mass Analyzer of Super Heavy Atoms).

СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

Во **введении** показана актуальность проводимых исследований потерь пучков ионов, обусловленных перезарядкой на остаточном газе, для создания методики оптимизации вакуумных систем циклотронных комплексов, формулируются цели и задачи диссертации, приводится краткое содержание диссертации.

Первая глава посвящена разработке методики моделирования потерь ионов вследствие перезарядки на остаточном газе, которая включает в себя алгоритм определения сечений перезарядки, зависящих от энергии иона, атомного номера, зарядового состояния иона и состава остаточного газа. Методика разработана на основе экспериментальных исследований по измерению сечений перезарядки ионов на молекулах остаточного газа на циклотронах ЛЯР и в результате анализа данных по сечениям перезарядки, полученных в других ускорительных центрах мира.

Эффективность прохождения пучком ионов участка пути длиной L , равна $T_{eff}(L) = I(L)/I_0$, т.е. отношению интенсивности пучка ионов в конце их траектории $I(L)$ к исходной интенсивности I_0 .

Учитывая потери пучка только из-за перезарядки ионов на остаточном газе, эффективность прохождения определяется следующим образом:

$$T_{eff} = \exp(-\sigma n L), \quad (1)$$

где σ – сечение перезарядки иона на остаточном газе в см²/молекула, n – концентрация молекул остаточного газа в молекула/см⁻³, размерность L – см. Поскольку концентрация молекул и давление P связаны выражением

$$P = n k T, \quad (2)$$

где $k = 1,0352 \cdot 10^{-19}$ в Тор·см³/К – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура в К, тогда

$$T_{eff} = \exp\left(-3.3 \times 10^{16} \int_0^L P(\ell) \sigma(\beta) \cdot d\ell\right), \quad (3)$$

где $d\ell$ – элемент длины пути иона в см, $P(\ell)$ – распределение давления вдоль траектории иона в Тор, β – относительная скорость (v/c , соответственно v – скорость иона и c – скорость света), $\sigma(\beta)$ – сечение перезарядки иона на остаточном газе в см²/молекула, при температуре остаточного газа $T = 293$ К.

Проведен анализ экспериментальных данных потерь ионов от перезарядки на молекулах остаточного газа, полученных как на ускорительных установках ЛЯР⁶ У-200, У-300, У-400 и У-400М, так и в других ускорительных центрах мира на основе обзора литературы. Систематизированы накопленные мировые

⁶ Г.Г. Гульбекян и др. “Исследование процесса перезарядки тяжелых ионов при их ускорении в циклотронах У-200, У-300 и У-400”, Препринт ОИЯИ, Р9-83-451, 1983.

экспериментальные данные по сечениям перезарядки и подходы в описании их теоретическими и полуэмпирическими зависимостями, иногда справедливые только для очень узких локальных диапазонов изменения основных параметров, как ускоряемого иона (массы, заряда и энергии), так и состава остаточного газа. Предложен алгоритм расчета сечений перезарядки ионов на молекулах остаточного газа в диапазоне энергий от 1 кэВ/нуклон до 100 МэВ/нуклон для ионов от водорода до урана, объединяющий полуэмпирические модели расчета для локальных диапазонов.

По итогам сравнительного анализа для наилучшего согласования с экспериментальными данными по ускорению ионов автором предложен следующий алгоритм расчета сечений перезарядки на основе использования отобранных трех расчетных выражений в соответствующем диапазоне энергии ускоряемых ионов:

- 1) формула **Muller-Salzborn** ⁷ для низких энергий ионов, составляющих примерно $(1 \div 40) \cdot q$, кэВ,
- 2) формулы **Betz and Schmelzer** ⁸ для энергий ионов до 1,5 МэВ/нуклон,
- 3) формулы **Blechschiidt** ⁹ для энергий ионов от 1,5 МэВ/нуклон до 100 МэВ/нуклон.

Данные формулы выглядят следующим образом:

$$1) \sigma_{q,q-1} = 1.43 \times 10^{-12} q^{1.17} P_i^{-2.76}, \quad (4)$$

здесь $\sigma_{q,q-1}$ (см²/молекула) – сечение захвата одного электрона, которое в данном диапазоне энергий значительно превышает сечение потери электрона, q – заряд иона, P_i (Джоуль) – энергия первой ступени ионизации мишени (остаточного газа).

$$2) \sigma_C = 2 \times 10^{-15} q^2 (137\beta)^{-5} \quad (5)$$

$$\sigma_L = 2 \times 10^{-15} (1+q)^2 (137\beta)^{-5} \times \exp\left(-\frac{2(q-\bar{q})+1}{2d^2}\right) \quad (5a)$$

здесь σ_C и σ_L – соответственно сечение захвата и сечение потери электрона, величина среднего заряда равна $\bar{q} = Z\{1 - C \cdot \exp(-137\beta\delta)\}$, коэффициент $C \cong 1$ имеет очень слабую зависимость от атомного номера Z , $\delta = 0.3443 - 0.0667 \ln(Z)$ и $d = 0.27\sqrt{Z}$. Остаточный газ – N₂ или воздух.

$$3) \sigma_C \cong 3 \times 10^{-28} q^{5/2} \beta^{-7} \quad (6)$$

$$\sigma_L \cong 9 \times 10^{-19} q^{-2/5} \beta^{-2} \quad (6a)$$

⁷ A. Muller and E. Salzborn, Phys. Lett., 62A, p.1391, 1977.

⁸ H.D. Betz and Ch. Schmelzer, UNILAC Report 1-67, Heidelberg (1967).

⁹ D. Blechschiidt and H. J. Halama, Proc. HIF work-shop, 136 (1977).

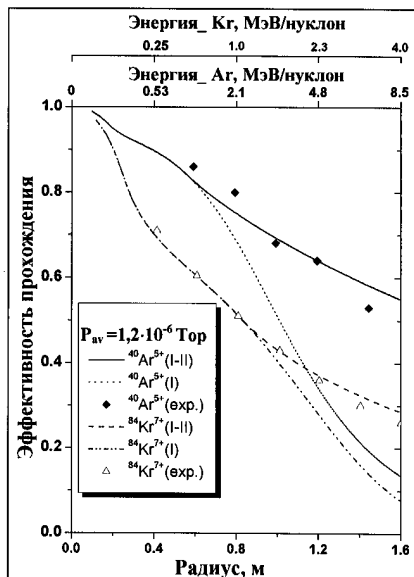


Рис. 1. Эффективности прохождения ускоряемых пучков в зависимости от радиусов орбит (и, соответственно, энергий – по верхней оси координат) в вакуумной камере циклотрона У-400. Сравнение расчета в соответствии с предложенным автором алгоритмом (кривые I–II), расчета по формулам Betz and Schmelzer (кривые I) и экспериментальных данных (символы) при ускорении ионов $^{40}\text{Ar}^{5+}$ (до 8,5 МэВ/нуклон) и $^{84}\text{Kr}^{7+}$ (до 4 МэВ/нуклон) при среднем давлении $P_{av} = 1,2 \cdot 10^{-6}$ Тор в вакуумной камере от центра до радиуса вывода $R_{\text{extraction}} = 160$ см.

Рис. 1 показывает хорошее совпадение результатов расчетов потерь пучков вследствие перезарядки на остаточном газе в соответствии с предложенным алгоритмом (кривые I–II) с результатами экспериментов (символы) по ускорению ионов аргона $^{40}\text{Ar}^{5+}$ и криптона $^{84}\text{Kr}^{7+}$ на циклотроне У-400. Среднее давление в вакуумной камере циклотрона от центра до радиуса вывода $R_{\text{extraction}} = 160$ см составляет $P_{av} = 1,2 \cdot 10^{-6}$ Тор с учетом радиального и азимутального распределения давления (в секторной магнитной структуре «холм – долина» камеры циклотрона). Рис. 1 наглядно демонстрирует, что использование формул (5)÷(5а) (Betz and Schmelzer) для ускоряемых ионов дает значительное расхождение расчетных кривых (I) с экспериментальными данными, тогда как использование предложенного автором алгоритма расчета (кривые I–II) позволяет достигнуть хорошего согласия результатов численного моделирования потерь пучка, обусловленных перезарядкой на остаточном газе, с экспериментальными данными.

Вторая глава посвящена разработке методики численного моделирования распределения давления остаточного газа по длине пути ускорения или транспортировки ионов.

Рассматриваемая область моделирования давлений в вакуумных камерах ускорительных установок – молекулярные режимы газовых потоков^{10,11,12,13}.

Для моделирования распределения давления в вакуумных объемах ускорительного комплекса рассмотрены два основных типа вакуумных камер, к сочетанию которых может быть сведена практически любая геометрическая конфигурация вакуумных камер:

- камера с азимутальной симметрией, например, циклотрона,
- протяженная вакуумная камера, например, канала транспортировки пучка ионов, канала масс-сепаратора или линейного ускорителя.

Для вакуумной камеры с азимутальной симметрией и с внутренним газовым потоком от центра (от источника ионов, расположенного в центре) радиальное распределение давления имеет вид:

$$P(r) = P_0 + \frac{Q}{G_{R-r}}, \quad (7)$$

где $P_0 = P(R)$ – давление на радиусе R , где установлены периферийные вакуумные насосы, Q – газовый поток от источника ионов, G_{R-r} – проводимость вакуумной камеры от текущего радиуса r до радиуса вакуумной камеры R .

Для вакуумной камеры циклотрона с азимутальной периодической геометрией типа «холм – долина», обусловленной секторной структурой полюсов магнита циклотрона, можно выполнить расчеты для радиального распределения давления в «холме» и «долине» и произвести усреднение по азимуту с учетом азимутальной протяженности «холма» и «долины» для нахождения среднего по азимуту радиального распределения давления в вакуумной камере циклотрона.

Проводимость вакуумной камеры циклотрона для радиального газового потока может быть получена из формулы Кнудсена:

¹⁰ Г.Л. Саксаганский. Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах. Атомиздат, Москва, 1980.

¹¹ Я. Грошковский. Техника высокого вакуума (2-е изд, перевод с польского). Мир, Москва, 1975.

¹² А.А. Глазков, И.Ф. Мальшев, Г.Л. Саксаганский. Вакуумные системы электрофизических установок. Атомиздат, Москва, 1975.

¹³ А.И. Пипко, В.Я. Плисковский, Е.А. Пенчко. Конструирование и расчет вакуумных систем. Энергия, Москва, 1979.

$$G_{R-r} = \frac{4}{3} v_a \frac{1}{\int_r^R \frac{\Pi(x)}{F^2(x)} dx}, \quad (8)$$

где v_a – средняя арифметическая тепловая скорость молекул, Π и F – периметр и площадь поперечного сечения азимутального периодического сегмента вакуумной камеры («холма» или «долины» между полюсами основного магнита циклотрона).

Газовый поток от источника ионов Q распределяется на газовые потоки в «холмах» и «долинах», пропорционально проводимостям соответственно «холма» G_H и «долины» G_V и с учетом количества n «холмов» или «долин» в вакуумной камере:

$$Q = n (Q_H + Q_V), \quad (9)$$

где газовый поток в «холме» Q_H можно выразить через газовый поток в «долине» Q_V следующим образом:

$$Q_H = Q_V \cdot G_H / G_V \quad (10)$$

Подставив (10) в (9), получим

$$Q_V = Q / [n (G_H / G_V + 1)] \quad (11)$$

Аналогично

$$Q_H = Q / [n (G_V / G_H + 1)] \quad (11a)$$

Из уравнений (7) и (8) получаем радиальное распределение давления для «холма»:

$$P(r) = P_0 + \frac{3nQ_H}{2\pi v_a h_H^2} \left[\ln \frac{R}{r} + \frac{nh_H(R-r)}{\pi Rr} \right], \quad (12)$$

Аналогично получаем радиальное распределение давления для «долины»:

$$P(r) = P_0 + \frac{3nQ_V}{2\pi v_a h_V^2} \left[\ln \frac{R}{r} + \frac{nh_V(R-r)}{\pi Rr} \right], \quad (13)$$

где n – число секторов полюса магнита циклотрона и соответственно число «холмов» или «долин» в вакуумной камере, h_H и h_V – зазор соответственно в «холме» и «долине», P_0 – давление на радиусе расположения периферийных вакуумных насосов.

Кроме рассмотренного выше вклада в радиальное распределение давления вследствие газового потока от источника ионов, расположенного в центре циклотрона, вносит вклад и газовыделение с поверхности вакуумной камеры вследствие термической десорбции.

Для *термической десорбции* радиальное распределение давления выглядит следующим образом:

$$P'(r) = P_0 + \int_r^R \frac{q\Pi}{G'_{R-r}} dx + \frac{1}{G'_{R-r}} \int_0^r q\Pi dx, \quad (14)$$

где q – удельное статическое газовыделение с поверхности.

Уравнение (14) после интегрирования приходит к следующему виду для «холма»:

$$P'(r) = P_0 + \frac{3nq}{\pi h_H^2 v_a} \left[\frac{\pi}{4n} (R^2 - r^2) + \frac{3}{2} h_H (R - r) + \frac{nh_H^2}{\pi} \ln \frac{R}{r} - \frac{\pi}{2n} R_0^2 \ln \frac{R}{r} - h_H R_0 \ln \frac{R}{r} - \frac{h_H R_0^2 (R - r)}{2Rr} - \frac{nh_H^2 R_0 (R - r)}{\pi Rr} \right] \quad (15)$$

и для «долины»:

$$P'(r) = P_0 + \frac{3nq}{\pi h_V^2 v_a} \left[\frac{\pi}{4n} (R^2 - r^2) + \frac{3}{2} h_V (R - r) + \frac{nh_V^2}{\pi} \ln \frac{R}{r} - \frac{\pi}{2n} R_0^2 \ln \frac{R}{r} - h_V R_0 \ln \frac{R}{r} - \frac{h_V R_0^2 (R - r)}{2Rr} - \frac{nh_V^2 R_0 (R - r)}{\pi Rr} \right] \quad , \quad (16)$$

где r изменяется от R_0 до R . Бесконечно малый ненулевой радиус R_0 вводится для корректного выполнения интегрирования и в нашем случае может быть, например, принят равным $R_0 = 1$ мм. Размерности величин в формулах (7)÷(16) – в системе СИ.

Далее суммируются вклады в радиальное распределение давления вследствие газового потока из внутреннего источника и вследствие десорбции в периодических сегментах вакуумной камеры («холме» и «долине»). Затем производится усреднение давления с учетом азимутальной протяженности сегментов для получения радиального распределения среднего по азимуту давления в вакуумной камере циклотрона.

Распределение давления в протяженной вакуумной камере длиной L может быть найдено как решение дифференциального уравнения:

$$\frac{d^2 p}{dx^2} = - \frac{q}{G(L)} \quad , \quad (17)$$

где q – удельное статическое газовыделение с поверхности, $G(L)$ – проводимость участка камеры длиной L . Рассмотрим объем камеры, откачиваемый с одной стороны со скоростью насоса S , тогда после двойного интегрирования уравнения (17) получим параболическое распределение давления $p(x)$:

$$p(x) = \frac{q\Pi L}{S} + \frac{q\Pi}{G(L)} \left(x - \frac{x^2}{2L} \right) \quad , \quad (18)$$

где Π – периметр поперечного сечения вакуумной камеры, а первое слагаемое в правой части уравнения $q\Pi L / S$ равно давлению $p(0)$ в месте установки насоса.

Расчет распределения давления для системы, состоящей из n элементов, может быть сделан посредством одновременного решения n уравнений типа (18). Индивидуальные решения должны быть объединены соответствующими граничными условиями.

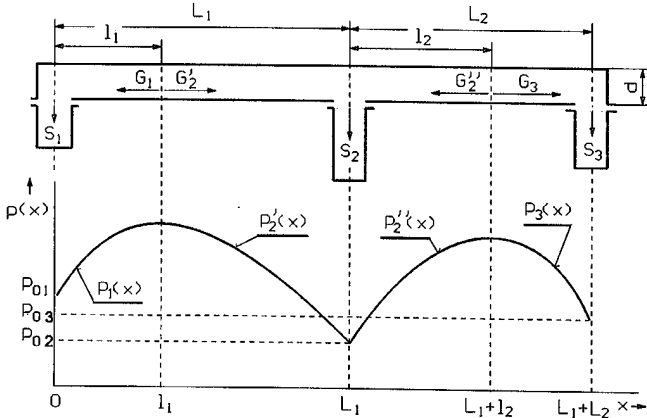


Рис. 2. Распределение давления $p(x)$ в расчетной модели вакуумной системы: цилиндрической трубе диаметром d , которая откачивается тремя насосами, установленными на расстояниях L_1 и L_2 со скоростями S_1 , S_2 и S_3 , G_1 , G_2' , G_2'' и G_3 – проводимости участков от положений максимумов давления до насосов.

Распределение давления в вакуумной системе, показанной в качестве примера расчетной модели на Рис. 2, может быть описано следующим образом:

– для первого участка длиной L_1

$$p_1(x) = \frac{q\Pi l_1}{S_1} + \frac{q\Pi}{G_1} \left(x - \frac{x^2}{2l_1} \right) \quad (19a)$$

$$p_2(x) = \frac{q\Pi(L_1 - l_1 + l_2)}{S_2} + \frac{q\Pi}{G_2} \left[L_1 - x - \frac{(L_1 - x)^2}{2(L_1 - l_1)} \right] \quad (19б)$$

– для второго участка длиной L_2

$$p_2''(x) = \frac{q\Pi(L_1 - l_1 + l_2)}{S_2} + \frac{q\Pi}{G_2'} \left(x - L_1 - \frac{(x - L_1)^2}{2l_2} \right) \quad (20a)$$

$$p_3(x) = \frac{q\Pi(L_2 - l_2)}{S_3} + \frac{q\Pi}{G_3} \left[L_1 + L_2 - x - \frac{(L_1 + L_2 - x)^2}{2(L_2 - l_2)} \right] \quad (20b)$$

где обозначение символов соответствует (18) и Рис. 2.

G_1 , G_2' , G_2'' и G_3 – проводимости участков от положений максимумов давления в координатах $x = l_1$ и $x = L_1 + l_2$ до положений насосов в координатах $x = 0$, $x = L_1$ и $x = L_1 + L_2$. Проводимости участков определяются из формулы Кнудсена для данного примера геометрии вакуумной системы следующим образом:

$$G_1 = A d^3 / l_1, \quad G_2' = A d^3 / (L_1 - l_1), \quad G_2'' = A d^3 / l_2 \quad \text{и} \quad G_3 = A d^3 / (L_2 - l_2), \quad (21)$$

где коэффициент $A = 121$ в системе СИ для молекул воздуха при комнатной температуре $T = 293\text{K}$.

Подставим $x = l_1$ в уравнения (19a) и (19b) и приравняем их правые части, т.к. $p_1(l_1) = p_2'(l_1)$.

Аналогично подставим $x = L_1 + l_2$ в уравнения (20a) и (20b) и приравняем их правые части, т.к. $p_2''(L_1 + l_2) = p_3(L_1 + l_2)$.

Получим систему из двух уравнений для двух неизвестных величин l_1 и l_2 .

Таким образом это дает возможность строить систему $n-1$ уравнений для вакуумной системы с n различными насосами произвольного местоположения и решать ее, например, методом Гаусса¹. Размерности величин в уравнениях (17) – (21) выражены в системе СИ.

Примеры применения разработанных методик численного моделирования распределения давления в вакуумной камере циклотрона и в протяженных вакуумных камерах ионопроводов. Рис. 3 представляет результаты численного моделирования распределений давления в вакуумной камере циклотрона У-400, характерных для рабочих режимов с применением внешнего ЭЦР-источника и внутреннего РИГ-источника. Распределение давления в протяженных вакуумных камерах ионопроводов внешней инжекции У-400 и У-400М показано на Рис. 4. Результаты расчетов находятся в хорошем согласии с данными измерений давления.

¹ Г.Корн, Т.Корн. Справочник по математике для научных сотрудников и инженеров, Москва, «Наука», 1984.

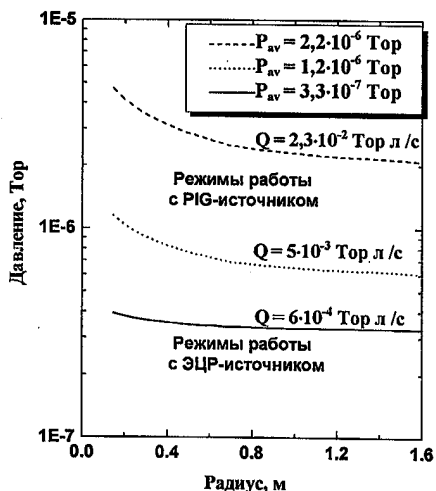


Рис. 3. Расчетное радиальное распределение давления в вакуумной камере циклотрона У-400 для режимов работы с внешним ЭЦР-источником и внутренним РИГ-источником.

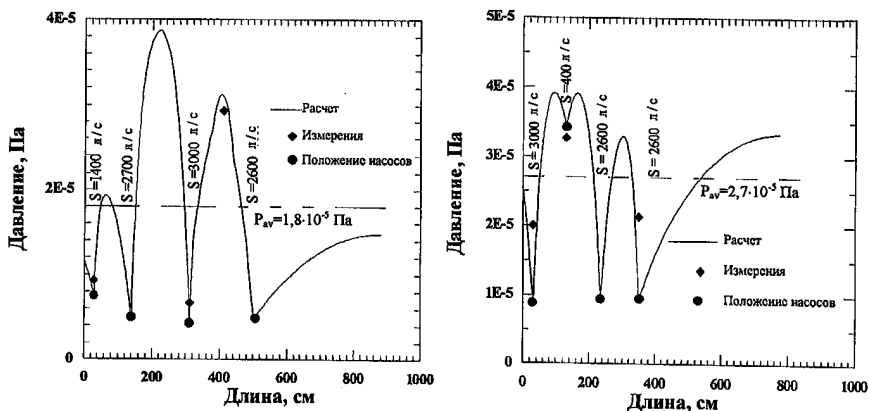


Рис. 4. Распределение давления в ионопроводах системы аксиальной инжекции пучка ионов циклотронных комплексов У-400 и У-400М.

Третья глава посвящена применению разработанного метода численного моделирования потерь ускоряемых ионов для оптимизации основных параметров вакуумных систем ускорительных комплексов в каналах инжекции, вакуумных камерах циклотронов и каналах транспортировки ускоренных пучков с помощью разработанных автором программ VACLOS и GENAP.

На основе разработанной автором методики разработана программа **VACLOS (VACuum LOSs of beam)** для оценки потерь ускоряемых пучков ионов вследствие перезарядки ионов на остаточном газе в вакуумных камерах с азимутальной симметрией (например, циклотронов). Программа включает следующие основные части:

- моделирование радиального распределения давления внутри вакуумной камеры циклотрона,
- расчет сечений перезарядки ускоряемых ионов на молекулах остаточного газа с учетом изменения энергии ионов и с учетом основных параметров соответствующего режима ускорения и
- вычисление эффективности прохождения ускоряемых ионов вследствие перезарядки ионов на остаточном газе, интегрирование в соответствии с выражением (3).

Программа **GENAP (GENeral Application for Pressures)** моделирует распределение давления для вакуумных камер протяженной геометрии, таких как ионопровод и т.д., и рассчитывает потери пучков ионов, обусловленные перезарядкой ионов на остаточном газе, при постоянной энергии транспортируемого иона. В программе используется значение сечения перезарядки ионов с энергией выведенного пучка с конечного радиуса ускорения, определенное программой VACLOS.

Сочетание программ VACLOS и GENAP позволяет моделировать потери пучков ионов с энергией в диапазоне от 1 кэВ/нуклон до 100 МэВ/нуклон для оптимизации системы откачки вакуумных камер практически любой геометрии.

В диссертации представлены результаты моделирования вакуумных потерь пучков и расчетов по оптимизации параметров вакуумных систем:

для модернизации

циклотронных комплексов У-400, У-400М, ИЦ-100 на основе современных ЭЦР-источников и систем аксиальной инжекции;

для создания

- циклотронного комплекса DC-72 Словацкой циклотронной лаборатории (Братислава);
- циклотронного комплекса DC-60 Междисциплинарного научно-исследовательского комплекса, Астана, Казахстан;
- канала транспортировки ускорительного комплекса радиоактивных пучков DRIBs на основе циклотронов У-400 и У-400М,
- экспериментально-физической установки масс-сепаратора MASHA (Mass Analyzer of Super Heavy Atoms).

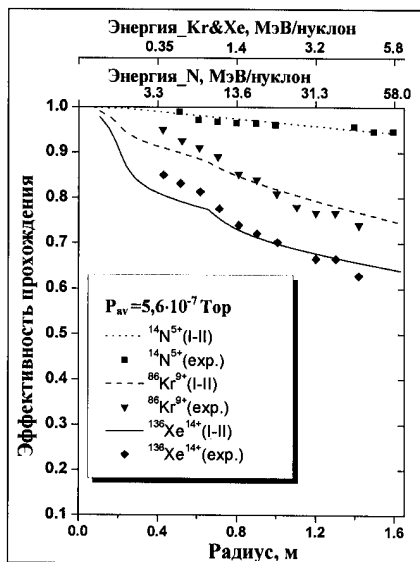


Рис. 5. Эффективности прохождения ускоряемых пучков в зависимости от радиусов орбит (и, соответственно, энергий – по верхней оси координат) в вакуумных камерах циклотронов У-400 для ионов $^{86}Kr^{9+}$ и $^{136}Xe^{14+}$ и У-400М для ионов $^{14}N^{5+}$, символы – экспериментальные данные.

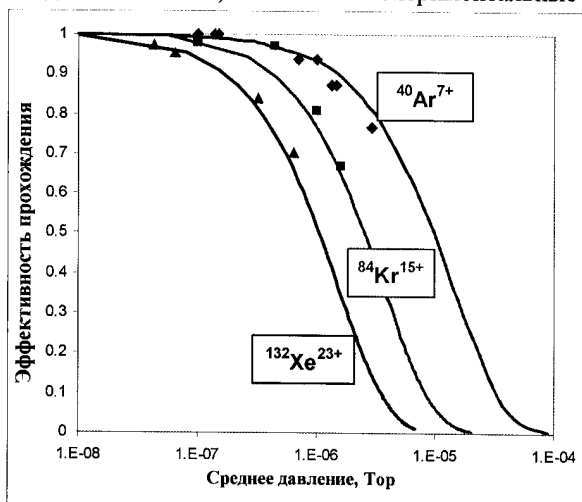


Рис. 6. Эффективности прохождения ускоряемых пучков до радиуса вывода в зависимости от среднего давления в вакуумной камере циклотрона ИЦ-100, символы – экспериментальные данные.

В результате выполненных расчетов выработаны требования к основным параметрам вакуумных систем для обеспечения необходимой эффективности прохождения ионных пучков в вакуумных камерах циклотронных комплексов.

На Рисунках 5 и 6 представлены расчетные эффективности прохождения различных ускоряемых ионов на циклотронах У-400М и ИЦ-100 в сравнении с экспериментальными данными.

Измерение давления производилось вакуумными датчиками и измерительными приборами компании PFEIFFER-VACUUM. Измерение интенсивности пучка ионов проведено пробниками с системой подавления вторичной эмиссии электронов. Погрешность измерений составляла не более 10%.

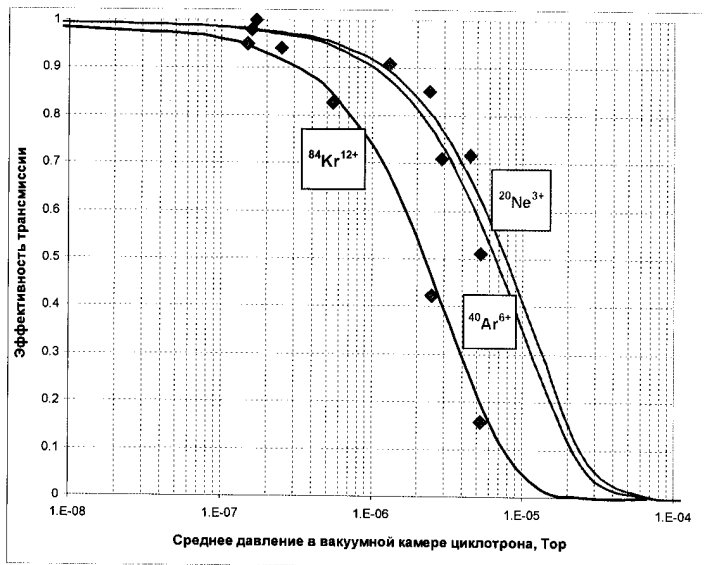


Рис. 7. Эффективности прохождения ускоренных пучков от центра до радиуса вывода $R_{\text{выв}} = 68$ см в вакуумной камере циклотрона DC-60 в зависимости от среднего давления в вакуумной камере циклотрона. Сравнение результатов моделирования и эксперимента по ускорению пучков ионов (символы – экспериментальные данные).

Проект создания циклотрона DC-60 успешно реализован в 2004÷2006 г. В ходе пуско-наладочных экспериментов ускорены ионы от азота до ксенона и измерены эффективности прохождения пучков ионов $^{14}\text{N}^{2+}$, $^{20}\text{Ne}^{3+}$, $^{40}\text{Ar}^{6+}$, $^{84}\text{Kr}^{12+}$ в зависимости от давления в камере циклотрона в процессе ускорения (см. Рис. 7). Расчетные данные по эффективности прохождения пучков ионов хорошо согласуются с экспериментом. Созданная в соответствии с

предложенной методикой вакуумная система позволила достигнуть 99÷97% трансмиссии пучка от центра до конечного радиуса, что хорошо согласуется с расчетами.

Полученные данные подтверждают правильность методики численного моделирования потерь, обусловленных перезарядкой ионов на остаточном газе, и оптимальность проектных параметров вакуумной системы.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Экспериментально исследованы процессы взаимодействия ионов с молекулами остаточного газа в циклотронах У-400, У-400М, ИЦ-100, DC-60. Измерены значения сечений перезарядки ионов на молекулах остаточного газа.
2. На базе результатов экспериментальных исследований на циклотронах ЛЯР и анализе опубликованных данных, полученных на ускорителях других научных центров, разработана методика численного моделирования вакуумных потерь ионов в процессе инжекции пучка в циклотрон, ускорения и транспортировки пучка на физические установки.
Методика описывает процесс перезарядки ионов от водорода до урана с энергией от 1 кэВ/нуклон до 100 МэВ/нуклон.
Разработанная методика применима для расчета вакуумных камер произвольного поперечного сечения с произвольным расположением вакуумных насосов.
3. С помощью разработанной методики численного моделирования:
 - оптимизированы вакуумные системы циклотронных комплексов У-400, У-400М и ИЦ-100,
 - разработаны и созданы вакуумные системы новых циклотронных комплексов
DC-72 (Словацкая циклотронная лаборатория, г.Братислава, Словацкая Республика),
DC-60 (Междисциплинарный научно-исследовательский комплекс, г. Астана, Казахстан),
 - создан канал транспортировки радиоактивных пучков ускорительного комплекса DRIBs на основе циклотронов У-400 и У-400М,
 - рассчитана и оптимизирована вакуумная система экспериментально-физической установки масс-сепаратора MASHA (Mass Analyzer of Super Heavy Atoms).
4. Проведен сравнительный анализ результатов численного моделирования потерь пучка ионов, обусловленных перезарядкой на

остаточном газе, и экспериментальных данных, полученных в ходе экспериментов на созданных установках. Расчетные и экспериментальные результаты находятся в хорошем согласии, что подтверждает правильность методики оптимизации вакуумных систем циклотронных комплексов.

Выполненный цикл исследований и разработанная методика расчета позволяют оптимально конструировать вакуумные системы циклотронных комплексов и физических установок.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. G.G. Gulbekian, **A.V. Tikhomirov**. Model Experiments on the $^{48}\text{Ca}^{+5,+6}$ Ions Acceleration at the U-400 Cyclotron. JINR FLNR Scientific Report 1995-1996, E7-97-206, Dubna, Russia, 1997, p. 280-281.
2. G.G. Gulbekian, M.N. El-Shazly, **A.V. Tikhomirov**, B.N. Gikal. Beam Loss Due to the Charge Exchange in the Residual Gas of the FLNR Heavy Ion Cyclotrons. In: Proc. XVII Particle Accelerator Conf., Vancouver, Canada, 12-16 May 1997, p.3610.
3. M.N. El-Shazly, J. Franko, G.G. Gulbekian, **A.V. Tikhomirov**. The Main Principals of Cyclotron Design. In: Proc. II Int. School and Workshop on Cyclotron and Applications, Cairo, Egypt, 15-19 March 1997, p. 64.
4. M.N.El-Shazly, J.Franko, G.G.Gulbekian, M.V.Khabarov, **A.V.Tikhomirov**, O.Szollos. Modelling of the Pressure Distribution in the Cyclotron Central Region. In: Proc. XV Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Caen, France, 14-19 June 1998, p. 254.
5. M.N.El-Shazly, G.G.Gulbekian, A.I.Ivanenko, M.V.Khabarov, **A.V.Tikhomirov**. Vacuum Beam Losses in the Axial Injection Systems of the FLNR Heavy Ion Cyclotrons. In: Proc. VI European Particle Accelerator Conf., Stockholm, 22-26 June 1998, p. 2172.
6. M.N.El-Shazly, B.N.Gikal, G.G.Gulbekian, **A.V.Tikhomirov**. Beam Loss Due to the Charge Exchange with the Residual Gas in the FLNR Heavy Ion Cyclotrons. In: Proc. VI European Particle Accelerator Conf., Stockholm, 22-26 June 1998, p. 2199.
7. M.N. El-Shazly, J. Franko, G.G. Gulbekian, M.V. Khabarov, O. Szollos, **A.V.Tikhomirov**. Investigation of the Transmission Efficiency in the Model of the Cyclotron Central Region. JINR FLNR Scientific Report 1997-1998, E7-2000-232, Dubna, Russia, 1999.
8. P. Kováč, **A.V.Tikhomirov**, M.N.El-Shazly, J. Dobrovodsky. Optimisation of the Vacuum System of a Linear Accelerator. J. Electr. Eng., Vol. 50, No. 1-2, 1999, pp. 22-27.

9. M.N. El-Shazly, **A. V. Tikhomirov**, G. G. Gulbekian, P. Kováč. GENAP - the Code for a Pressure Distribution Calculation. *J. Vacuum*, Vol. 52, Elsevier Science, 1999, pp. 401-405.
10. M.N. El-Shazly, G.G. Gulbekian, **A.V. Tikhomirov**. Computing Simulation of the Beam Loss due to the Charge Exchange with the Residual Gas. In: Proc. III Int. School and Workshop on Cyclotron and Applications, Cairo, Egypt, February 6-10, 1999, pp. 64-74.
11. M.N. El-Shazly, J. Franko, G.G. Gulbekian, M.V. Khabarov, O. Szollos, **A.V.Tikhomirov**. Modelling of the Pressure Distribution in the Cyclotron Central Region. JINR FLNR Scientific Report 1997-1998, E7-2000-232, Dubna, Russia, 1999, p. 248.
12. **A.Tikhomirov**, G.Gulbekian, R.Oganessian, M. El-Shazly. Computer modelling of the beam transmission efficiency dependent on the charge exchange with the residual gas for the CI-100 cyclotron. In: Proc. VI Int. Computational Accelerator Physics Conference, Darmstadt, Germany, September 11-14, 2000, p. 127.
13. V.S.Aleksandrov, G.G.Gulbekian, N.Yu.Kazarinov, V.F.Shevtsov, **A.V.Tikhomirov**. Numerical Simulation of the $^{48}\text{Ca}^{5+}$ Ions Transport along the U-400 Cyclotron's Injection Line. In: Proc. 16th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, East Lansing, Michigan, USA, May 12-17, 2001, pp. 390-392.
14. **A. Tikhomirov**, G. Gulbekian, R. Oganessian, M. El-Shazly Modeling of the Beam Transmission Efficiency Dependent on the Charge Exchange with the Residual Gas for the CI-100 Cyclotron. In: Proc. Int. Particle Accelerator Conf. (PAC2001), Chicago, USA, June 18-22, 2001, pp. 3042-3044.
15. M.N. El-Shazly, G.G. Gulbekian, **A.V. Tikhomirov**. Computer Simulation of the Pressure Distribution for Cyclotron's Vacuum Chamber and Ion Beam Guide Line. *J. Applied Surface Science*, Vol. 169-170, Elsevier Science, 2001, pp. 781-786.
16. V.V.Bashevoy, M.N.El-Shazly, G.G.Gulbekian, M.V.Khabarov, I.V.Kolesov, V.N.Melnikov, R.Ts.Oganessian, **A.V.Tikhomirov**. The study of the transmission efficiency of the DRIBs transport lines. *Nuclear Physics A* 701 (2002), pp. 592-596.
17. B.N. Gikal, G.G. Gulbekyan, **A.V. Tikhomirov** et. al. Upgrading of IC-100 Cycle Implantator. Communication of JINR, P9-2003-121, Dubna, Russia, 2003.
18. **A.V. Tikhomirov**, G.G. Gulbekian, B.N. Gikal, R.Ts. Oganessian. Numerical simulation of the beam transmission efficiency for design of vacuum system of the DC-72 cyclotron. In: Proc. 19th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'04), Dubna, Russia, October 4-8, 2004, pp.501-503.
19. B.N. Gikal, G.G. Gulbekyan, ... **A.V. Tikhomirov** et al. Upgrading of DC-40 cyclotron. In: Proc. 17th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, Tokyo, Japan, October 18-22, 2004, p. 138.

20. B.N. Gikal, G.G. Gulbekyan, ... **A.V. Tikhomirov** et al. Project of the DC-60 Cyclotron With Smoothly Ion Energy Variation For Research Center At L.N.Gumilev Euroasia State University In Astana (Kazakhstan). In: Proc. 17th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, Tokyo, Japan, October 18-22, 2004, p. 205.
21. B.N.Gikal, G.G. Gulbekyan, ... **A.V.Tikhomirov** et al. Channel of Axial Injection of DC-60 Cyclotron. Communication of JINR, P9-2006-39, Dubna, Russia, 2006.
22. Б.Н.Гикал, С.Н.Дмитриев, Г.Г.Гульбекян, ... **А.В.Тихомиров** и др. Ускорительный комплекс ИЦ-100 для проведения научно-прикладных исследований. Препринт ОИЯИ, P9-2007-20, Дубна, 2007, Письма в ЭЧАЯ, 2008, Т. 5, № 1(143), с. 59-85.
23. **A.V.Tikhomirov**, B.N.Gikal, G.G.Gulbekian. Modeling of accelerated ion transmission efficiency for design of the vacuum system of the DC-60 cyclotron. In: Proc. 14th Russian Scientific and Technical Conference with participation of foreign specialists "Vacuum Science and Technique", Sochi, Russia, October 9-14, 2007, Ed. by D.V.Вуков, МИЕМ, Moscow, pp.32-36.
24. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, ... **А.В.Тихомиров**. Результаты ускорения пучков ионов азота, аргона, криптона в ходе пуско-наладочных работ на изохронном циклотроне ДЦ-60. Сообщение ОИЯИ, P9-2007-80, Дубна, 2007.
25. Б.Н.Гикал, С.Н.Дмитриев, Г.Г.Гульбекян, ... **А. В. Тихомиров** и др. Циклотронный комплекс ДЦ-60 для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий. Препринт ОИЯИ, P9-2007-104, Дубна, 2007, Атомная Энергия, 2007, т. 103, № 6, с.357-364.
26. Б. Н. Гикал, **А. В. Тихомиров**, М. В. Хабаров, О. А. Чернышев. Вакуумная система циклотронного комплекса тяжелых ионов DC-60. Препринт ОИЯИ P9-2007-156, Дубна, 2007, Письма в ЭЧАЯ, 2008, т. 5, № 4 (146), с.655-674.

Получено 21 ноября 2008 г.

Отпечатано методом прямого репродуцирования
с оригинала, предоставленного автором.

Подписано в печать 21.11.2008.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,78. Тираж 100 экз. Заказ № 56416.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.
E-mail: publish@jinr.ru
www.jinr.ru/publish/