

ОБЗОРЫ

УДК 621.384.8(09)

Памяти Владимира Антоновича ПАВЛЕНКО
посвящается

**МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ
СКБ АНАЛИТИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

© Р.Н. Галль

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 30 июня 1999 г.

Приведены в хронологическом порядке с комментариями данные о масс-спектрометрах, разработанных СКБ АП и НТО АН СССР, областях их применения, объемах выпуска совместно с заводами.

ВВЕДЕНИЕ

Первый в мире масс-спектрометр был создан в 1919 году Френсисом Уильямом Астоном — иностранным член-корреспондентом Российской Академии наук. Он же впервые определил изотопный состав большинства стабильных элементов Периодической системы.

Работы по созданию промышленных масс-спектрометров начались в СССР в конце Великой Отечественной войны в Сухумском Физико-техническом институте созданием прототипа масс-спектрометра для изотопного анализа МС-1. Затем работы были продолжены в НИИ Минрадиопроба в пос. Фрязино под Москвой и в Ленинграде. До 1955 года было разработано три типа масс-спектрометров для изотопного анализа: МС-1, МС-2 и МС-3 — и выпущены партии этих приборов для нужд науки и атомной промышленности СССР. Были также разработаны масс-спектрометрические газоанализаторы МАГС-1 и МАГС-2, начата разработка масс-спектрометра с высокой разрешающей способностью на базе исследований, проводимых в Институте физических проблем под руководством чл.-корр. АН СССР Н.Е. Алексеевского.

В 1954 году комиссия Совета Министров СССР рассмотрела предложения и возражения Минрадиопроба и Академии Наук о передаче разработок и производства масс-спектрометров в ГСКБ приборов газового анализа (прежнее название СКБ аналитического приборостроения) и пришла к выводу о целесообразности такого шага. Совет Министров СССР Постановлением от 25 декабря 1954 года в целях дальнейшего развития работ по разработке и производству в СССР масс-спектрометров передал эти работы ГСКБ приборов газового анализа.

Одной из целей данной статьи — показать динамику разработок и серийного выпуска отечественной масс-спектрометрической аппаратуры.

НАЧАЛЬНЫЙ ЭТАП РАБОТ ПО МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ В СКБ АП АН СССР (1955-1960 ГГ.)

На этом этапе было необходимо разрешить целый ряд проблем: организация системы разработки и выпуска масс-спектрометров, набор и обучение кадров, освоение новых технологических процессов, освоение выпуска масс-спектрометров разработки Минрадиопроба. Была выбрана следующая организационная схема: научно-исследовательская лаборатория — руководитель разработки, специализированный конструкторский отдел, группа технологов и цех опытного производства с необходимым специализированным оборудованием для изготовления деталей и узлов приборов, а также их сборки и комплексной настройки. В середине 1955 года такая организационная структура была создана. Лабораторию возглавил и руководил ею до 1974 года А.М. Шерешевский. Впоследствии из этой лаборатории была выделена группа сотрудников, вошедшая в состав новой лаборатории — динамических масс-спектрометров, которую возглавил и руководил ею до 1974 года А.Э. Рафальсон. Кадровый состав лаборатории, в основном, был представлен молодыми специалистами, выпускниками ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина), ЛИТМО и ЛПИ им. М.И. Калинина. Для обучения сотрудников основам масс-спектрометрии был приглашен сотрудник РИАН проф. Г.Р. Рик, по основам вакуумной техники и вакуумной гигиены лекции прочел А.М. Шерешевский. (Рис. 1 — первый состав лаборатории).

Наряду с процессом обучения проводились работы по корректировке и доработке технической документации приборов, выбранных для освоения: изотопных приборов МС-2М (МИ1301), МС-3М (МИ1303), а также масс-спектрометрического газоанализатора МАГС-2 (МХ1301).

В 1956 г. были выпущены 5 изотопных приборов, в 1957 г. — два прибора МХ1301.



Рис. 1. Молодость масс-спектрометрии в СКБ АП – НТО АН СССР.
Четвертый справа — зав. лабораторией А.М. Шерешевский

В том же, 1956 г., была начата разработка нового масс-спектрометра МИ1305 для изотопного анализа газов, паров жидкостей и твердых веществ. Разработка была завершена в 1957 г. и было выпущено 12 приборов. Такие приборы были необходимы как для исследований в атомной промышленности, так и в геохимии, геохронологии, биологии и других областях науки и техники. Прибор имел диапазон $1+400$ а.е.м. при разрешающей способности 300 (на уровне 5% высоты пиков), при чувствительности по аргону 0,001. Он был на уровне лучших зарубежных аналогов и в течение длительного времени пользовался большой популярностью. Всего в СКБ АП и на Сумском заводе электронных микроскопов и масс-спектрометров было изготовлено 665 таких приборов, в том числе 74 прибора на экспорт (1957 + 1969 гг.).

Надо сказать, что в первые годы работ СКБ АП по масс-спектрометрии основное внимание уделялось трем группам приборов: для изотопного анализа, для химического (молекулярного) анализа и для космических исследований.

В рамках группы изотопных приборов в 1958 г. были разработаны приборы МВ2301 - МВ2302 — масс-спектрометры для анализа изотопного состава газовых смесей, содержащих мультиплеты масс, с высокой разрешающей способностью — 5000 на 50% высоты пиков с возможностью измерений в диапазоне масс от 1 до 200 а.е.м. Прибор был разработан для Научного центра атомной промышленности (впоследствии известного как Арзамас-16). Прибор стал первым в мире магнитным спектрометром со столь высокой разрешаю-

щей способностью, достигнутой за счет применения неоднородного магнитного поля и удачной конструкции магнитного анализатора. Прибор был отмечен золотой медалью на Международной выставке в Брюсселе. Всего было выпущено 24 прибора, в том числе 2 на экспорт.

В 1960 г. была закончена разработка изотопного прибора МИ1306 для анализа твердых и газовых проб, а также счетчика ионов СИ-01. МИ1306 обладал повышенной разрешающей способностью — до 800, и рекордной по тому времени чувствительностью по урану — 10^{-12} г. Входивший в его комплект счетчик ионов СИ-01 содержал впервые примененный в масс-спектрометрии вторичный электронный умножитель с открытым входом, диоды которого не изменяли своих свойств при перюдическом соприкосновении с атмосферным воздухом. Конструктивно СИ-01 являлся автономным устройством, присоединительные размеры которого обеспечивали возможность использования его в масс-спектрометрах других типов. Он обеспечивал измерение ионных токов в интервале $5 \cdot 10^{-11} + 2 \cdot 10^{-18}$ А как в интегральном режиме, так и в режиме счета отдельных ионов. Всего СКБ АП АН СССР и Сумским заводом было изготовлено 234 счетчика ионов, в том числе 3 на экспорт.

В этот же период проводились разработки масс-спектрометров для химического (молекулярного) анализа. Так, в 1957-1958 г.г. был разработан прибор МХ-1302 для анализа состава газовых смесей и легко испаряющихся веществ. Диапазон масс — $2+80$ а.е.м., разрешающая способность (на уровне 5% высоты пиков) — 80, чувствительность по CO_2 — 0,02%. Всего СКБ АП и Сумский

завод выпустили в 1958-66 гг. 158 масс-спектрометров этого типа, которые широко использовались в химической, нефтеперерабатывающей, металлургической и других областях.

В 1959 г. была завершена разработка масс-спектрометров МХ5201 и МХ1303. Первый из них предназначался для химического анализа промышленных газов в процессе нефтепереработки. Было изготовлено три таких прибора. Масс-спектрометр МХ1303 был более универсальным прибором по применению и обладал высокими техническими характеристиками. Эти характеристики определили его долгую жизнь. Диапазон масс — 2+600 а.е.м., разрешающая способность — 400, чувствительность по аргону — 0,002%. В его состав входила система напуска для анализа газообразных жидких и твердых веществ с нагревом до 350°C. Прибор выпускался до 1971 года СКБ АП АН СССР и Сумским заводом было изготовлено более 200 приборов.

Третьим направлением работ в это время, да и в дальнейшем тоже, была разработка масс-спектрометров для космических исследований, которая началась с приборов для изучения ионного и нейтрального состава верхних слоев атмосферы. В 1958 году была закончена разработка и изготовлено 7 образцов радиочастотного масс-спектрометра МХ6401. Эта работа явилась большим достижением — были решены проблемы минимизации веса, энергопотребления, автоматического вскрытия прибора на заданной высоте, передачи информации, устойчивости к вибрации и к перегрузкам при взлете ракеты и целый ряд других.

В следующем 1959 году был выпущен прибор аналогичного назначения МХ6402, изготовлено 4 образца.

В 1959 году СКБ АП, по согласованию с Комиссией по масс-спектрометрии АН СССР, приняло решение о разработке единой серии масс-спектрометров для изотопного и химического анализа и приступило к созданию комплекса лабораторных масс-спектрометров из унифицированных узлов и блоков, собираемых в той или иной комбинации в зависимости от назначения прибора.

РАБОТЫ СКБ АП АН СССР В 1960 + 1975 ГГ.

Этот период характерен стремлением к более глубокому пониманию физических процессов, протекающих в масс-спектрометрах различных типов и принятию технических решений, основанных на полученных знаниях, обеспечивающих высокие параметры приборов. К их числу относились физические эффекты в системах ввода и испарения проб веществ, процессы ионизации и формирования пучков ионов в источниках, разделения ионов в магнитных и электрических полях и их

комбинациях с учетом влияния краевых полей, неконтролируемых неоднородностей магнитного поля в электромагнитах, технологии обработки железа для полеобразующих электромагнитов, допусков при изготовлении деталей и сборке узлов, влияния рассеяния ионов на атомах и молекулах остаточных газов и ряда других.

В это время были созданы группы теоретиков для поддающихся расчету эффектов и экспериментаторов для моделирования электронно- и ионнооптических систем.

Эти исследования велись в рамках общего настроя руководства СКБ АП на стремление к достижению рекордных параметров приборов при их серийном выпуске (В.А. Павленко). В то время заметно облегчился доступ к информации о масс-спектрометрах зарубежных фирм, что также способствовало улучшению качества разрабатываемых приборов.

В 1963 году была завершена разработка единой серии масс-спектрометров, включившей в себя три модификации изотопных приборов МИ1308 + МИ1311, параметры и аналитические возможности которых повышались с ростом номера, за счет присоединения дополнительных узлов и блоков, а также две модификации химических приборов МХ1304 и МХ1306. Прибор МХ1304 обладал сравнительно небольшим диапазоном масс 2+75 а.е.м. при разрешающей способности 250 и предназначался для рутинного анализа смесей газов и легколетучих жидкостей. Прибор МХ1306 предназначался для научных исследований и обладал существенно более высокими параметрами: диапазон масс до 900 а.е.м. при разрешающей способности 900 и возможности поддерживать каналы системы напуска исследуемых проб при температуре до 300° С. Всего с 1962 г. по 1970 г. было выпущено более 200 масс-спектрометров единой серии.

В рассматриваемый период работы СКБ АП проводились работы с использованием, помимо магнитного и радиочастотного, других типов масс-анализаторов.

В 1962 году был разработан масс-спектрометр МХ1202 с циклоидальной фокусировкой ионного пучка для анализа органических веществ, в 1969 г. — МХ1203 для анализа газов и легколетучих жидкостей (7 приборов), омегатронный масс-спектрометр МХ4301 для анализа остаточных газов в вакуумных системах, времяпролетный быстродействующий масс-спектрометр МХ5301 для анализа сложных смесей с температурой кипения до 250 °С, малогабаритный времяпролетный прибор МХ5401 для автоматического анализа нейтрального состава атмосферы для использования на ракетах.

В 1965 г. была завершена разработка малогабаритного радиочастотного масс-спектрометра МХ6407П с высокой чувствительностью для анализа ионного и нейтрального состава атмосферы в диапазоне 1-48 а.е.м. с передачей данных на вход радиотелеметрической системы. Эти приборы широко использовались в космических исследованиях. Всего СКБ АП и Сумской завод изготовили 570 приборов. В 1968 г. завершена разработка медицинского масс-спектрометра МХ6202 на базе радиочастотного масс-анализатора для анализа выдыхаемого воздуха. Прибор давал возможность изучать все фазы дыхательного цикла, в том числе при хирургических операциях, в послеоперационный период и при профилактических обследованиях. Широко применялся в различных медицинских учреждениях. Всего было изготовлено более 120 приборов.

Этот же период характеризует создание масс-спектрометров с различными видами ионизации.

В приборе МХ1311, разработанном в 1965 г. с участием НИФИ ЛГУ (Ф.И. Вилесов), была применена фотоионизация ультрафиолетовым излучением He, Ag и других газов для получения информации о потенциалах ионизации молекул и потенциалах появления осколочных ионов, об ионизационных переходах ионов на колебательный уровень в процессах автоионизации сложных молекул из высоковозбужденных состояний, а также для изучения целого ряда других физических процессов. В 1969 году прибор был модернизирован при участии Института молекулярной биологии (ИБМ), а также биохимии и физиологии микроорганизмов (ИБФМ АН СССР). Прибор был снабжен системой прямого ввода пробы и быстродействующей системой регистрации масс-спектров. Всего было изготовлено 8 приборов с фотоионизацией.

(Рис. 2 — космонавты нередкие гости в СКБ АП).



Рис. 2. Космонавты в лаборатории масс-спектрометрии СКБ АП

В 1968 г. завершена разработка масс-спектрометра МХ3301 для определения элементного состава твердых веществ, включая микропримеси до $10^{-7}\%$. Был разработан источник ионов с искровой ионизацией, применена классическая ионно-оптическая схема Маттауха-Герцога с возможностью регистрации всех элементов таблицы Менделеева как на фотопластинку, так и электрометрическим методом.

В ГЕОХИ АН СССР на этом приборе были проанализированы образцы лунного грунта, доставленного на Землю советской автоматической станцией. При этом было израсходовано менее 1 мг лунного грунта. Всего было изготовлено 9 таких приборов.

В 1966 г. завершена разработка многокаскадного масс-спектрометра МВ3301 с тройной фокусировкой (по двум направлениям и по энергии) для изотопного анализа урана и трансурановых элементов. Прибор обладал рекордной абсолютной чувствительностью — 10^{-14} г. по урану, при рекордной изотопической чувствительности — 10^{-7} на соседних массах в области урана. В приборе впервые была применена обращенная геометрия ионно-оптической системы, резко сократившая вклад рассеянных ионов, мешавших достижению высокой изотопической чувствительности. В приборе впервые был применен трубчатый ионизатор, обеспечивший столь высокую абсолютную чувствительность. Прибор эксплуатировался в Институте атомных реакторов.

В 1963 г. на основе работ Института химической физики АН СССР (В.Л. Тальрозе) был разработан хромато-масс-спектрометр МХ1307, позволявший выполнять качественный и количественный анализы сложных смесей неизвестного состава без предварительной градуировки. Этот прибор был пионером промышленных хромато-масс-спектрометров, снабженных каталогами масс-спектров. Каталог содержал масс-спектры 1200 наиболее часто встречающихся веществ.

В 1966 г. прибор был модернизирован (МХ1307М). Прибор выпускался до 1976 г. и всего их было изготовлено СКБ АП и Сумским заводом более 190 экз.

В эти годы были разработаны масс-спектрометры для решения специализированных задач Институтами АН СССР и других ведомств. Масс-спектрометры МС1301 и МС1303 для изучения молекулярного состава и структуры молекул паров трудноиспаряющихся веществ при температурах до 3000 °К, испарения кристаллов, термодинамики и кинетики поверхностных реакций. Приборы имели разрешающую способность 600 + 800 в диапазоне массовых чисел 1+1000 а.е.м.. В них впервые в серийных приборах была применена модуляция молекулярного пучка паров исследуе-

мого вещества, позволившая отстроиться от общего газового фона, неизбежного при столь высоких температурах.

К этому времени стало ясно, что дальнейшее развитие масс-спектрометрической техники невозможно без быстродействующих систем обработки получаемой информации. С этой целью была создана лаборатория вычислительной техники, которую возглавил А.Ф. Борнгард. Первой большой работой этой лаборатории стала система обработки информации "РОМБ-1" на базе ЭВМ "Днепр-1" для масс-спектрометра МС3301, обладавшего высокой разрешающей способностью $\approx 20\ 000$ и предназначенного для точного определения масс ионов, элементного состава и структуры сложных молекул. Этот прибор был первенцем приборов с высокой разрешающей способностью. Практически все масс-спектрометры, разработанные в дальнейшем имели в своем составе ту или иную ЭВМ.

Так, например, хромато-эффузио-масс-спектрометр МХ1312, разработанный совместно с ИХФ АН СССР включал в себя спектроаналитический вычислитель Роса-1, после модернизации прибора замененный на серийную ЭВМ "Искра". СКБ АП и Сумской завод выпустили 160 таких приборов.

В 1974-1975 г.г. была завершена разработка целого ряда приборов с высокими параметрами. Это — прибор МИ1320 для изотопного анализа твердых веществ с разрешающей способностью 2000 в диапазоне масс до 500 а.е.м., с точностью измерений отношений U_{235}/U_{238} в природном уране $\approx 0,1\%$. Выпущено 18 таких приборов. Масс-спектрометр МИ1330 для изотопного анализа газов и легко испаряющихся жидкостей ($T_{кип} < 100\ ^\circ\text{C}$), был разработан при участии ИГЕМ АН СССР, пользовался большой популярностью, было изготовлено 65 таких приборов.

При участии ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР (Б.А. Мамырин) был разработан магниторезонансный масс-спектрометр МИ9302 с изотопической чувствительностью по изотомам гелия до 10^{-9} .

Разработка масс-спектрометров унифицированного комплекса завершилась созданием масс-спектрометра МХ1310 со сверхвысокой разрешающей способностью до 100 000 в диапазоне массовых чисел 2+2600 а.е.м. Чувствительность по аргону при разрешающей способности 10 000 составляла $1 \cdot 10^{-4}$. Прибор был оборудован устройством для прямого ввода проб, системой для точного измерения масс ионов, устройством для анализа нестабильных ионов. В приборе была возможность использования химионизации и ионизации в сильном электрическом поле. В масс-спектрометре была разветвленная система обработки информации с ЭВМ СМ-4, большая библио-

тека спектров с возможностью ее наращивания и использования библиотек спектров пользователей. Несмотря на сложность и высокую стоимость были удовлетворены заказы на поставку 16 таких масс-спектрометров, в том числе 1 экспортный. (На рис. 3: масс-спектрометр МХ1310 — предмет гордости СКБ АП и объект пристального интереса высоких академических гостей).

РАБОТЫ СКБ АП И НТО АН СССР В 1976 + 1998 ГГ.

Этот период характеризуется следующими основными событиями.

Начали работы по масс-спектрометрии и выпустили первые партии приборов Экспериментальный завод научных приборов АН СССР (ЭЗНП) в пос. Черноголовка (1977 г.) и ПО "Научприбор" в г. Орле (1978 г.).

Принято решение о строительстве Экспериментального завода аналитических приборов в г. Ломоносове (1976 г.).

Создано в Ленинграде Научно-техническое объединение АН СССР с включением в его состав Института аналитического приборостроения, организуемого на базе исследовательских лабораторий СКБ АП и других организаций. На Институт аналитического приборостроения АН СССР была возложена функция головной организации Объединения. Возглавил Институт и Объединение В.А. Павленко (1977 г.).

Организованы лаборатории Института, в том числе занимающиеся разработками в области масс-спектрометрии (1978 г.).

Смена руководства СКБ АП (1977 г.) положила начало деструкции созданной системы разработки приборов: исследования – документация – производство (1978 г.).

Было сменено руководство Института и НТО АН СССР (1984 г.). Затем создано акционерное объединение "Научные приборы" на базе ленинградских организаций НТО АН СССР и осуществлен выход из АН СССР (1990 г.).

В 1977 г. завершена разработка прибора МИ3304 для изотопного анализа твердых веществ, газов и паров для исследований в области ядерной физики. Масс-спектрометр разработан на основе ионно-оптической схемы с двойной фокусировкой с обращенной геометрией (см. МВ3301) с разрешающей способностью 20 000 в диапазоне масс $1 + 500$ а.е.м. и порогом чувствительности по урану $(3 + 5) \cdot 10^{-13}$ г. В составе прибора была система обработки информации на базе спектроаналитического вычислителя "Роса-1". Прибор передан Институту атомной энергии.

В 1978 г. завершена разработка радиочастотного масс-спектрометра МХ6411, предназначенного для анализа химического и изотопного состава

газовых смесей при давлении окружающей среды от 10 до 100 атмосфер. Диапазон масс — $12+140$ а.е.м. при разрешающей способности 35 и пороге чувствительности по аргону $3 \cdot 10^{-4}$. Прибор был установлен на космических станциях Венера-11, -12, -13 и -14. Приборы включались на высоте 24 км от поверхности Венеры и работали вплоть до посадки. Они позволили получить данные о составе атмосферы Венеры, в том числе обнаружить аномалию изотопного состава аргона.

В 1980 г. разработан квадрупольный масс-спектрометр МХ7302 для изучения состава газов, паров и молекулярных пучков. Изготовлено 14 экземпляров прибора, в основном для АН СССР и АН союзных республик.

В 1979 г. закончена разработка новой модели медицинского масс-спектрометра МХ6203, для медико-биологических и физиологических исследований. Прибор был разработан в тесном сотрудничестве с Военно-медицинской Академией им. С.М. Кирова и явился крупным достижением СКБ, вобравшим в себя успехи СКБ в деле создания космических масс-спектрометров, опыт эксплуатации прибора МХ6202, опыт врачей ВМА им. С.М. Кирова и талант и настойчивость группы разработчиков прибора. Прибор позволил реализовать целый ряд медицинских методик, в том числе впервые в мире появилась возможность одновременного анализа как концентрации, так и объема выдыхаемых газов. Кроме того, прибор позволял исследовать газообмен даже малых участков поверхности тела. Масс-спектрометр выпускался в больших количествах Сумским заводом.

В 1982 г. закончена разработка квадрупольного масс-спектрометра МС7303, используемого для изучения кинетики гомогенных и гетерогенных процессов. Прибор стоял в первых рядах квадрупольных масс-спектрометров различных зарубежных фирм, серийно выпускался ЭЗНП и Сумским заводом.

В 1981 г. была закончена разработка прибора МХ5302 на базе времяпролетного масс-анализатора с ионным зеркалом (масс-рефлектор). Разработка проводилась совместно с ФТИ АН СССР, прибор был предназначен для изучения быстропротекающих процессов в широком диапазоне массовых чисел. Изготовлено 3 образца для ФТИ АН СССР, Института атомной энергии и НИФХИ им. Карпова.

В 1982 г. разработан прибор МИ9309 на основе магнитно-резонансного масс-анализатора для изотопного анализа инертных газов с изотопным отношением до 10^9 ($^3\text{He} - ^4\text{He}$), для обнаружения микропримесей в смесях газов на уровне 10^{-9} .

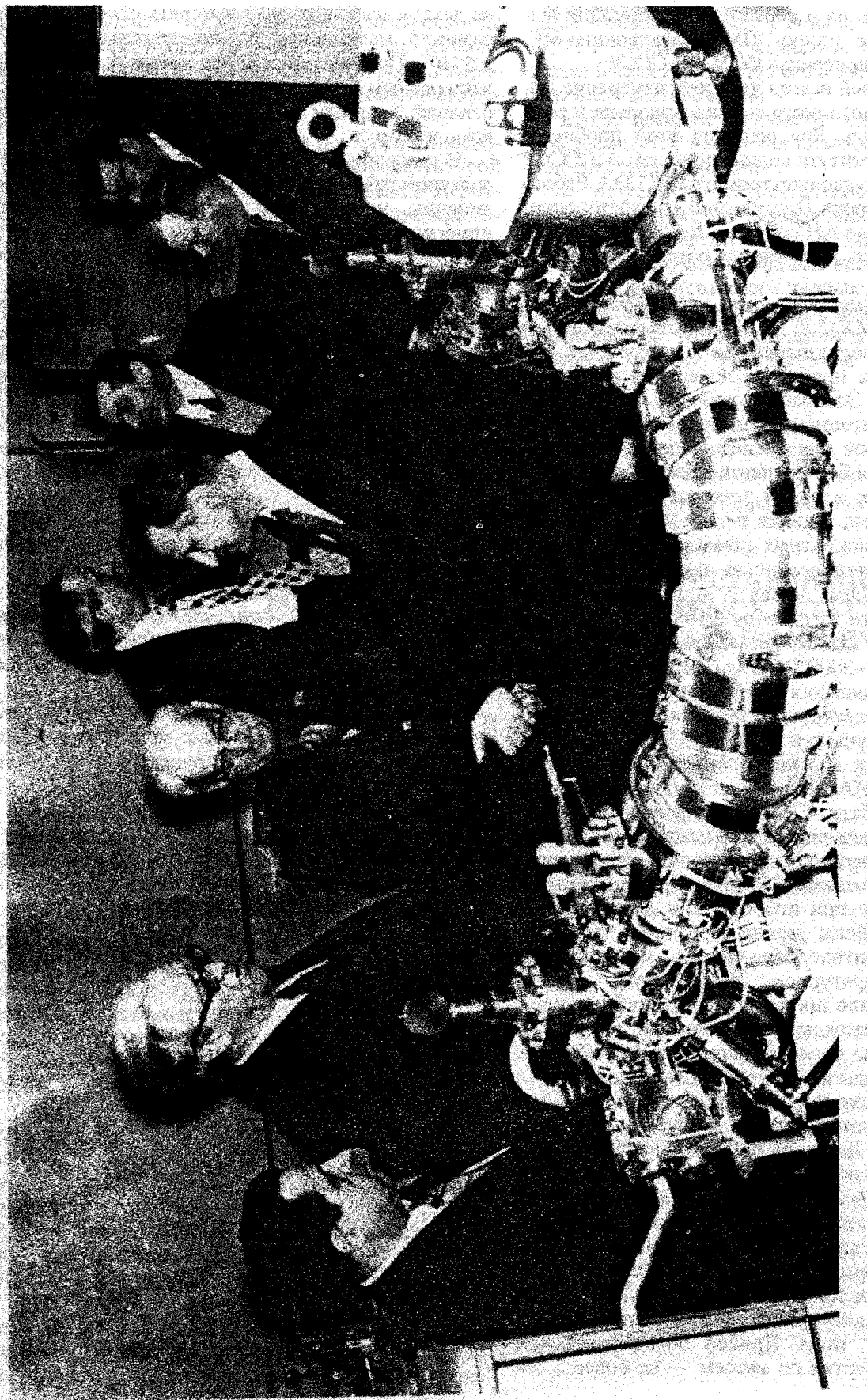


Рис. 3. У масс-спектрометра с рекордно высокой разрешающей способностью МХ1310 слева направо: А.А. Рассадин, В.А. Павленко, В.А. Котельников, А.М. Прохоров, Р.Н. Галль, О.Н. Яковлев, М.Д. Шугтов

Система управления и обработки информации выполнена на базе микро-ЭВМ "Электроника-60". Опытный образец передан ФТИ АН СССР.

Важной задачей всегда являлось измерение малых вариаций изотопного состава водорода и ряда других элементов. Для решения этой проблемы при участии Института водных проблем АН СССР был разработан масс-спектрометр МХ1332. Работа была предусмотрена Программой многостороннего сотрудничества АН соцстран и была выполнена на уровне лучших зарубежных образцов того времени.

В 1983 г. была завершена разработка масс-спектрометра МХ1320 с высокотемпературным испарителем, предназначенным для изучения физико-химических процессов испарения труднолетучих веществ. Эта работа вобрала в себя опыт разработки изотопных, химических приборов, а также приборов для исследования труднолетучих веществ. Прибор предназначался для исследований в области ядерной техники и энергетики, ракетной техники, техники и технологии огнеупоров и многокомпонентных сплавов.

Разрешающая способность прибора 10 000 в диапазоне массовых чисел $1 + 1000$ а.е.м., при чувствительности по серебру $5 \cdot 10^{-13}$ А/Па. Прибор оснащен тремя видами испарителей для работы в диапазоне 500+3000 °К. В состав прибора входила система управления и обработки информации на базе ЭВМ "Электроника 60". Масс-спектрометр разработан при участии ИХФ АН СССР.

При создании Института аналитического приборостроения (ИАНП) часть сотрудников и часть материальной базы СКБ АП перешли в ИАНП. Основными достижениями Института в области масс-спектрометрии явились, во-первых, создание впервые в мире метода ЭРИАД — экстракции ионов из раствора при атмосферном давлении, во-вторых, дальнейшее развитие расчетов электронно- и ионнооптических систем масс-спектрометров. Аппаратурное обеспечение метода ЭРИАД позволило производить идентификацию и исследования сложных органических веществ в растворах, в том числе термически неустойчивых соединений биологического происхождения.

В 1988 г. были разработаны и изготовлены три опытных образца такого масс-спектрометра (ХЖ-МХ3303). Документация на него была передана на Орловский завод. Диапазон масс прибора 1+4000 а.е.м. Разрешающая способность более 25 000 при использовании источника ионов с электронным ударом и более 3000 в режиме ЭРИАД. Прибор обладал высокой чувствительностью к примесям солей металлов в растворах — по воднометанольному раствору карбоната рубидия не хуже $2 \cdot 10^{-12}$ моля. Прибор обладал высокой скоростью развертки по массам — не более 2 сек

на декаду масс, позволял измерять относительную разность масс ионов с погрешностью не хуже $\pm 5 \cdot 10^{-6}$. Прибор работал совместно с серийным жидкостным хроматографом "Миллихром" и был оснащен мощным измерительно-вычислительным комплексом.

В развитии расчетов оптических систем масс-спектрометров особо следует отметить расчеты влияния неточностей изготовления элементов приборов (допусков) на их выходные характеристики — разрешающую способность и чувствительность.

В 1989 году был разработан прибор для измерения малых вариаций изотопного состава газов методом попеременного измерения "образец — стандарт". Параметры прибора соответствовали мировому уровню, в частности, погрешность измерения отношения $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ не превышала 0,015%. Прибор имел четыре исполнения в зависимости от комплектности разработанных систем подготовки проб.

В этот же период был разработан прибор МХ6403 для контроля утечки ракетного топлива. Было изготовлено 4 образца.

На базе разработанных ранее квадрупольных масс-спектрометров были разработаны 5 модификаций квадрупольных масс-спектрометров, отличающихся длиной стержней от 50 мм до 270 мм, и изготовлено по 1 образцу.

Проводились работы по созданию опытных образцов ионного микрозонда с пространственным разрешением 1+2 микрона, однако в связи с усилиями нового руководства по развалу НТО АН СССР и СКБ АП эти работы не были завершены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе по созданию масс-спектрометрических приборов участвовало множество талантливых исследователей, конструкторов, технологов, рабочих, сотрудников вспомогательных подразделений, упомянуть каждого из которых в статье невозможно. Численность СКБ АП АН СССР в 1956 г. составляла 600 человек, в 1980 г. — 2700 человек.

Выдающаяся роль принадлежит Начальнику Главного конструктору СКБ АП АН СССР, впоследствии Генеральному директору НТО АН СССР, первому директору Института аналитического приборостроения РАН, Владимиру Антоновичу Павленко, светлый ум и неиссякаемая энергия которого обеспечили создание указанных выше приборов.

Необходимо отметить, что в СКБ и НТО его усилиями были развиты также такие направления аналитического и научного приборостроения как

газовый анализ, хроматография, спектроскопия ядерного магнитного резонанса и электронного парамагнитного резонанса, электронная спектроскопия, мессбауэровская спектроскопия и ряд других.

Под его руководством были построены и оснащены технологической базой и инфраструктурой комплексы зданий на Рижском проспекте, Дерптском пер., пер. Лодыгина, проспекте Маршала Говорова в г. Санкт-Петербурге и в г. Ломоносове.

Большое внимание он уделял серийному выпуску приборов на заводах. Масс-спектрометры выпускались на трех заводах, а вообще, приборы разработки СКБ АП выпускались 11 заводами различных ведомств.

Труды Владимира Антоновича были отмечены высокими наградами Родины — Ленинской пре-

мией, званием Героя Социалистического труда (1977 г.), орденами и медалями. К сожалению, тяжелая болезнь вынудила его в 1984 году отойти от активной деятельности.

Его преемники не сумели сохранить полученное наследство — ни технологическое, ни кадровое, ни организационное.

В результате их деятельности значительная часть оборудования разворована или испорчена, квалифицированные кадры в значительной мере утеряны, разрушена цепочка: исследования — техническая документация — производство.

В последнее время, правда, появились признаки возрождения этого направления аналитического приборостроения, хотя на этом пути достаточно трудностей.

To the memory of Vladimir Antonovich Pavlenko

MASS-SPECTROMETRIC INSTRUMENTS OF SPECIAL DESIGN BUREAU OF ANALYTICAL INSTRUMENTATION AND SCIENCE & TECHNOLOGY CORPORATION OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

R.N. Gall

Institute for Analytical Instrumentation RAS, St. Petersburg

The mass spectrometers developed at the Special Design Bureau of Analytical Instrumentation and Science & Technology Corporation of the USSR Academy of Sciences are reviewed in chronologic order. The application fields and volumes of production in association with manufacturing plants are also discussed.